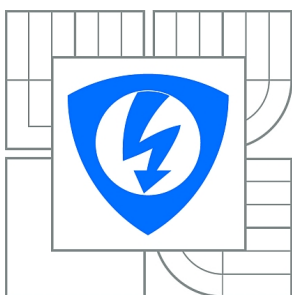




VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY



FAKULTA ELEKTROTECHNIKY A KOMUNIKAČNÍCH
TECHNologiÍ

ÚSTAV AUTOMATIZACE A MĚŘICÍ TECHNIKY

FACULTY OF ELECTRICAL ENGINEERING AND COMMUNICATION
DEPARTMENT OF CONTROL AND INSTRUMENTATION

MEMS INERCIÁLNÍ SNÍMAČE

MEMS INERTIAL SENSOR

DIPLOMOVÁ PRÁCE

MASTER'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Bc. JURAJ MIHALKO

VEDOUcí PRÁCE

SUPERVISOR

doc. Ing. PETR BENEŠ, Ph.D.

BRNO 2012



VYSOKÉ UČENÍ
TECHNICKÉ V BRNĚ

Fakulta elektrotechniky
a komunikačních technologií

Ústav automatizace a měřicí techniky

Diplomová práce

magisterský navazující studijní obor
Kybernetika, automatizace a měření

Student: Bc. Juraj Mihaľko

ID: 106636

Ročník: 2

Akademický rok: 2011/2012

NÁZEV TÉMATU:

MEMS inerciální snímače

POKYNY PRO VYPRACOVÁNÍ:

Cílem diplomové práce je navrhnout a ověřit metodiku měření vybraných statických parametrů MEMS inerciálních snímačů zrychlení, příp. úhlové rychlosti.

1) Nastudujte a přehledně zpracujte metody používané pro měření hlavních parametrů inerciálních snímačů včetně diskuze parametrů potřebného přístrojového a testovacího vybavení nutného k těmto měřením. Zaměřte se především na oblast MEMS snímačů.

2) Po dohodě s vedoucím práce a v závislosti na dostupném přístrojovém vybavení vybrané statické parametry vhodných snímačů proměřte, např. vliv teploty a napájecího napětí na stabilitu offsetu. Provedené experimenty podrobně zdokumentujte a zpracujte formou protokolu o měření.

DOPORUČENÁ LITERATURA:

Aggarwal, P.; Syed, Z.: MEMS-Based Integrated Navigation. Artech House, 2010.

Termín zadání: 6.2.2012

Termín odevzdání: 21.5.2012

Vedoucí práce: doc. Ing. Petr Beneš, Ph.D.

Konzultanti diplomové práce:

doc. Ing. Václav Jirsík, CSc.

Předseda oborové rady

UPOZORNĚNÍ:

Autor diplomové práce nesmí při vytváření diplomové práce porušit autorská práva třetích osob, zejména nesmí zasahovat nedovoleným způsobem do cizích autorských práv osobnostních a musí si být plně vědom následků porušení ustanovení § 11 a následujících autorského zákona č. 121/2000 Sb., včetně možných trestněprávních důsledků vyplývajících z ustanovení části druhé, hlavy VI. díl 4 Trestního zákoníku č.40/2009 Sb.

Abstrakt

Cieľom tejto diplomovej práce bolo popísať základné meracie metódy pre meranie inerciálnych snímačov, popísať ich fyzikálne princípy a chyby.

Ďalším krokom bolo vybrať jeden parameter a ten otestovať na viacerých snímačoch a vyhodnotiť výsledky merania. Meranie inerciálnych snímačov je veľmi dôležité pre parametrizovanie ich chýb a ich následný matematický popis, pomocou ktorého môžeme minimalizovať vplyv chýb pri navigácii.

Praktická časť práce je venovaná meraniu stability offsetu. Pre spracovanie a napájanie bola použitá karta NI-USB 6215, ktorá umožňuje napájať dva akcelerometre súčasne pomocou dvoch analógových výstupov. Bolo premeraných sedem inerciálnych snímačov od štyroch výrobcov. Pre meranie boli použité dve zapojenia s NI-USB, z ktorých sa zisťovalo, ktorý je lepší pre potlačenie presluchu medzi kanálmi. Pre overenie, že karta NI-USB 6215 je dostačujúca, bola použitá meracia karta NI PXI 4462.

Boli stanovené parametre pre popis zmeny inerciálnych snímačov, a to zmena medzi počiatočnou a koncovou hodnotou merania výstupu, rozptyl hodnôt, na ktorých sa snímače po 72 iteráciách ustávajú a čas ustálenia snímača.

Kľúčové slová

MEMS inerciálne snímače, akcelerometer, gyroskop, meranie inerciálnych snímačov, chyby inerciálnych snímačov

Abstract

The aim of this master's thesis was to describe the basic measurement methods for measurement of inertial sensor, their physical principles and errors.

The next step was to select a specific parameter, then test it on a number of sensors and evaluate the results. Measurement of inertial sensors is very important for the parametrization of their errors and their subsequent mathematical model by which it is possible to minimize their impact on inertial navigation.

The practical part is dedicated to the measurement of stability of the offset. Data acquisition card NI-USB 6215, which can supply two accelerometers at the same time using analog outputs, was used for data acquisition and power supply. It was tested on seven inertial sensor from four manufacturers. Two connection methods with NI-USB 6215, by whose it was determined which one is better to suppress the crosstalk between channels, were used for measurement. The NI PXI 4462 was used to verify that the NI-USB 6215 card is sufficient.

The parameters for description of the changes in inertial sensors were established, transition between the initial and final value of the output measurement, variance of the values on which the sensor fixates after 72 iterations, and the fixation time of the sensor.

Keywords

MEMS inertial sensor, accelerometer, gyroscope, inertial sensor measurement, inertial sensor errors

Bibliografická citácia:

MIHALKO, J. *MEMS Inerciální snímače*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, 2012. 78s. Vedúci diplomovej práce bol doc. Ing. Petr Beneš, Ph.D.

Prehlásenie

„Prehlasujem, že svoju diplomovú prácu na tému MEMS Inerciální snímače som vypracoval samostatne pod vedením vedúceho diplomovej práce a s použitím odbornej literatúry a ďalších informačných zdrojov, ktoré sú všetky citované v práci a uvádzané v zozname literatúry na konci práce.

Ako autor uvedenej diplomovej práce ďalej prehlasujem, že v súvislosti s vytvorením tejto diplomovej práce som neporušil autorské práva tretích osôb, hlavne som nezasiahol nedovoleným spôsobom do cudzích autorských práv osobnostných a som si plne vedomý následkov porušenia ustanovenia § 11 a nasledujúcich autorského zákona č. 121/2000 Sb., vrátane možných trestnoprávných dôsledkov vyplývajúcich z ustanovení časti druhej, hlavy VI. diel 4 Trestného zákonníka č. 40/2009 Sb.

V Brne dňa: **18.mája 2012**

.....
podpis autora

Pod'akovanie

Ďakujem vedúcemu diplomovej práce doc. Ing. Petrovi Benešovi, Ph.D. za účinnú metodickú, pedagogickú a odbornú pomoc a ďalšie cenné rady pri spracovaní mojej diplomovej práce.

V Brne dňa: **18.mája 2012**

.....
podpis autora

Obsah

1	Úvod	12
2	Inerciálne snímače a zdroje ich chýb	14
2.1	Akcelerometre	14
2.1.1	Princíp akcelerometra	14
2.1.2	Príklad síl pôsobiacich na akcelerometer [5]	14
2.1.3	Piezoelektrické akcelerometre [3]	16
2.1.4	Piezorezistívne akcelerometre [8]	17
2.1.5	Tepelné akcelerometre [8]	19
2.1.6	Kapacitné akcelerometre	20
2.2	Gyroskopy	21
2.2.1	Princíp gyroskopu	21
2.2.2	Mechanický gyroskop	23
2.2.3	MEMS gyroskopy	23
2.2.4	Optický gyroskop	28
2.3	Chyby inerciálnych snímačov	28
2.3.1	Bias	28
2.3.2	Scale Factor	29
2.3.3	Ortogonalita (vychýlenie osi)	29
2.3.4	Šum	29
2.4	Meracie modely	29
2.4.1	Model akcelerometra [3]	29
2.4.2	Model gyroskopu [3]	30
2.5	Allanova odchylka	30
2.6	Meranie MEMS akcelerometrov a gyroskopov [1]	31
2.6.1	Úvod	31
2.6.2	Testovacie vybavenie	32
2.6.3	Zariadenia pre zber dát	33
2.6.4	Test stability	33
2.6.5	Long-term stability test	34
2.6.6	Teplotný test	34
2.6.7	Test magnetickej citlivosti	35
2.6.8	Test na centrifuge	36
2.6.9	Nárazový (Shock) test	38
2.6.10	Vibračný test	38
3	Meranie stability offsetu	41
3.1	Úvod	41
3.2	Meranie s NI-USB 6215 bez regulovanej teplotnej komory	41
3.2.1	ADXL335	42

3.2.2	MMA7260QT	43
3.2.3	Zhodnotenie	44
3.3	Meranie s NI-USB 6215 s prepojenými kanálmi.....	45
3.3.1	Spracovanie meraní	46
3.3.2	ADXL 193	47
3.3.3	ADXL 321	49
3.3.4	ADXL 335	50
3.3.5	MMA 7260QT	52
3.3.6	MMA 7361L	54
3.4	Meranie s NI-USB 2615 s kanálmi pripojenými ku AGND	56
3.4.1	ADXL 193	57
3.4.2	ADXL 335	57
3.4.3	MMA7260QT	59
3.4.4	MMA 7361L	61
3.4.5	MEMSIC MXA6500	62
3.4.6	Panasonic GS3 61231.....	63
3.5	Meranie offsetu s kartou PXI 4462	66
3.5.1	ADXL 193	67
3.5.2	MMA 7260QT	67
3.5.3	MMA 7361L	69
4	Zhodnotenie	71
5	Záver.....	74

Zoznam obrázkov

Obrázok č. 2.1	Prierez piezoelektrickým akcelerometrom [7].....	17
Obrázok č. 2.2	Prierez akcelerometrom s piezorezistívnym princípom[7].....	18
Obrázok č. 2.3	Princíp funkcie kapacitného akcelerometra [6]	21
Obrázok č. 2.4	Rotácia zemských os a os telesa [5]	22
Obrázok č. 2.5	Mechanický gyroskop [10]	23
Obrázok č. 2.6	Spôsoby natočenia a rotácie gyroskopov [11]	24
Obrázok č. 2.7	Príklad pôsobenia Coriolisovej sily [11]	25
Obrázok č. 2.8	Zjednodušená schéma MEMS gyroskopu [11].....	25
Obrázok č. 2.9	Dual Mass gyroskop[15]	26
Obrázok č. 2.10	Fyzikálny princíp tuning fork gyroskopu[16].....	26
Obrázok č. 2.11	Tuning fork gyroskop[16].....	27
Obrázok č. 2.12	Štruktúra Ring gyroskopu [17]	28
Obrázok č. 2.13	Príklad priebehu Allanovej odchýlky [12]	31
Obrázok č. 2.14	Grasebyho stôl [1]	34
Obrázok č. 2.15	Schematický diagram teplotného testu pre akcelerometer [1].....	35
Obrázok č. 2.16	Zapojenie s Helmholtzovými cievkami [1]	36
Obrázok č. 2.17	Fotografia centrifugy používanej pre testovanie snímačov [1].....	37
Obrázok č. 3.1	Všeobecná schéma zapojenia.....	42
Obrázok č. 3.2	Schéma zapojenia vývojovej dosky akcelerometra ADXL335	42
Obrázok č. 3.3	Priebeh výstupu akcelerometra ADXL 335 v čase	43
Obrázok č. 3.4	Schéma zapojenia vývojovej dosky akcelerometra MMA7260QT .	44
Obrázok č. 3.5	Priebeh výstupu akcelerometra MMA7260QT v čase	44
Obrázok č. 3.6	Pracovisko merania stability offsetu.....	46
Obrázok č. 3.7	Schéma zapojenia merania offsetu s prepojenými kanálmi.....	47
Obrázok č. 3.8	Schéma zapojenia ADXL193	48
Obrázok č. 3.9	ADXL193 priemerovaný výstup Xout	48
Obrázok č. 3.10	Schéma zapojenia ADXL321 [23]	49
Obrázok č. 3.11	ADXL321 priemerovaný výstup Yout	49
Obrázok č. 3.12	ADXL335 priemerovaný výstup Xout	50
Obrázok č. 3.13	ADXL335 priemerovaný výstup Yout	51
Obrázok č. 3.14	ADXL335 priemerovaný výstup Zout.....	51
Obrázok č. 3.15	MMA7260QT priemerovaný výstup Xout	52
Obrázok č. 3.16	MMA7260QT priemerovaný výstup Yout	53
Obrázok č. 3.17	MMA7260QT priemerovaný výstup Zout.....	53
Obrázok č. 3.18	Schéma zapojenia MMA7361L [24].....	54
Obrázok č. 3.19	MMA7361L priemerovaný výstup Xout.....	55
Obrázok č. 3.20	MMA7361L priemerovaný výstup Yout.....	55
Obrázok č. 3.21	MMA7361L priemerovaný výstup Zout	56

Obrázok č. 3.22 Schéma zapojenia merania offsetu s kanálmi pripojenými na zem..	56
Obrázok č. 3.23 ADXL193 priemerovaný výstup Xout s gnd.....	57
Obrázok č. 3.24 ADXL335 priemerovaný výstup Xout s gnd.....	58
Obrázok č. 3.25 ADXL335 priemerovaný výstup Yout s gnd.....	58
Obrázok č. 3.26 ADXL335 priemerovaný výstup Zout s gnd	59
Obrázok č. 3.27 MMA7260QT priemerovaný výstup Xout s gnd.....	60
Obrázok č. 3.28 MMA7260QT priemerovaný výstup Yout s gnd.....	60
Obrázok č. 3.29 MMA7260QT priemerovaný výstup Yout s gnd.....	61
Obrázok č. 3.30 MMA7361L priemerovaný výstup Yout s gnd.....	61
Obrázok č. 3.31 MMA7361L priemerovaný výstup Zout s gnd	62
Obrázok č. 3.32 MEMSIC MXA6500 priemerovaný výstup Xout s gnd.....	63
Obrázok č. 3.33 MEMSIC MXA6500 priemerovaný výstup Yout s gnd.....	63
Obrázok č. 3.34 Schéma zapojenia akcelerometra GS3 61231[25]	64
Obrázok č. 3.35 GS3 61231 priemerovaný výstup Xout s gnd.....	64
Obrázok č. 3.35 GS3 61231 priemerovaný výstup Yout s gnd.....	65
Obrázok č. 3.36 GS3 61231 priemerovaný výstup Zout s gnd	65
Obrázok č. 3.37 Schéma zapojenia merania offsetu s kartou PXI 4462	66
Obrázok č. 3.38 ADXL 193 priemerovaný výstup PXI4462.....	67
Obrázok č. 3.39 MMA 7260QT Xout priemerovaný výstup PXI4462	68
Obrázok č. 3.40 MMA 7260QT Yout priemerovaný výstup PXI4462	68
Obrázok č. 3.41 MMA 7260QT Zout priemerovaný výstup PXI4462.....	69
Obrázok č. 3.42 MMA 7361L Xout priemerovaný výstup PXI4462	69
Obrázok č. 3.43 MMA 7361L Yout priemerovaný výstup PXI4462	70
Obrázok č. 3.44 MMA 7361L Zout priemerovaný výstup PXI4462.....	70
Obrázok č. 4.1 Vyhodnotenie merania s prepojenými susednými kanálmi.....	71
Obrázok č. 4.2 Vyhodnotenie merania s kanálmi pripojenými k AGND	72
Obrázok č. 4.3 Vyhodnotenie merania s použitím karty PXI 4462.....	73

1 ÚVOD

Umenie navigácie sa dá považovať za veľmi staré umenie prípadne zručnosť, ktorá prerástla do komplexnej vedy. V podstate je to celé o cestovaní a o spôsobe ako nájsť cestu z jedného miesta na druhé, a toho môžeme dosiahnuť niekoľkými spôsobmi[3].

Jeden zo spôsobov navigácie, ktorý sa v súčasnosti používa je inerciálna navigácia. Pri inerciálnej navigácii sa zisťuje zmena polohy pomocou inerciálnych snímačov. Medzi inerciálne snímače patria gyroskopy a akcelerometre, pomocou ktorých vypočítavame postupný pohyb zariadení v rámci vnútorného inerciálneho systému súradníc. Využíva sa pre navigáciu vozidiel, lietadiel, ponoriek, rakiet, atď. Technológia vznikla v roku 1910 v Nemecku.[7]

Inerciálny navigačný systém sa skladá z meracej jednotky obsahujúcej akcelerometre, gyroskopy a z navigačného počítača, ktorý slúži na vyhodnocovanie dát z meracích zariadení. Na rozdiel od ostatných navigačných systémov, je inerciálna navigácia úplne sebestačná a nezávislá na okolitom prostredí. Systém nepotrebuje iné objekty ako napríklad družice a je odolná voči vonkajším vplyvom ako je napríklad počasie, elektronické rušenie a skreslenie signálu.[7,8]

Matematické operácie v inerciálnom navigačnom systéme sú založené na Newtonovom pohybovom zákone. Tento zákon hovorí o tom, že vyprodukovaná sila je priamo úmerná zrýchleniu telesa. Podľa danej závislosti je možné vypočítať zmenu rýchlosti a pozície v čase. Zrýchlenie pohybu, respektíve silu vznikajúcu pri zmenách rýchlosti pohybujúceho sa predmetu a gravitačné zrýchlenie, silu vzniknutú pôsobením gravitácie Zeme, je zaznamenávané inerciálnymi senzormi, akcelerometrami. [7,8]

Pre účel navigácie v súradnicovom systéme je dôležité udržanie akcelerometrov v referenčnom súradnicovom systéme, čo je princíp inerciálnej navigácie so stabilizovanou platformou. Tento prístup dosahuje v mnohých ohľadoch lepšie výsledky. Je náročný na realizáciu a je nákladný. Na stabilizáciu platformy sa využívajú gyroskopy, pomocou ktorých sa zisťuje rotácia a náklon platformy. [7,8]

Vzhľadom k tomu, že každý voľný objekt v priestore má šesť stupňov voľnosti (vnútorné vzájomne nezávislé premenné), z toho dôvodu sa inerciálny navigačný systém skladá prevažne z troch gyroskopov a troch akcelerometrov, kde každá dvojica (gyroskop, akcelerometer) je schopná zaznamenať rotáciu alebo zrýchlenie v smere jednej osy kolmej na ostatné. Zo šiestich stupňov sú tri lineárne stupne voľnosti a to posun v ose x, y, z , tie udávajú pozíciu objektu a tri stupne voľnosti rotácie a to otočenia okolo osy x, y, z (Θ, ψ, ϕ), tie udávajú polohu objektu. Pokiaľ poznáme týchto šesť premenných, je známa aj poloha objektu. Ak sú tieto údaje sledované istý čas je z nich možné určiť dráhu a rýchlosť objektu.[7,8]

Z toho vyplýva, že pre presné určenie pozície požadujeme, aby snímače vykazovali, čo najmenšiu chybu, najlepšie nulovú. Pri reálnom meraní to nie je možné. Preto

je potrebné tieto chyby definovať, vytvoriť model a chyby následne odstrániť, prípadne ich vplyv minimalizovať.

Táto práca sa venuje popisu základných fyzikálnych princípov akcelerometrov a gyroskopov, popisuje základné chyby, ktoré sa pri inerciálnych snímačoch vyskytujú a popisu niektorých metód pre meranie inerciálnych snímačov, popisuje ich postup, základné prvky meracieho reťazca.

2 INERCIÁLNE SNÍMAČE A ZDROJE ICH CHÝB

V tejto časti sú rozobraté princípy a technológie používané na súčasnom trhu s MEMS akcelerometrami a gyroskopmi. Ďalej sú rozobraté hlavné zdroje chýb inerciálnych senzorov. Ako posledné sú rozoberané metódy pre minimalizáciu alebo úplné potlačenie týchto chýb.

2.1 Akcelerometre

2.1.1 Princíp akcelerometra

V dnešnej dobe skoro najviac rozšírené snímače. Hlavnou veličinou, ktorú akcelerometre snímajú je zrýchlenie. Akcelerometre dokážu merať gravitačné a aj dynamické zrýchlenie. Gravitačné zrýchlenie je prítomné vždy a je ho potrebné pri meraní dynamického zrýchlenia odstrániť filtráciou. To, či snímač dokáže merať len gravitačné zrýchlenie závisí od princípu vyhotovenia (kapacitný, tepelný, piezorezistívny, piezoelektrický). V angličtine sa často objavuje aj názov force sensor alebo specific force sensor (SFS). Specific force označuje celkový newtonov vektor sily F , ktorý pôsobí na teleso (vozidlo) o hmotnosti M t.j.

$$\mathbf{a} = \frac{\mathbf{F}}{M} \quad m/s^2 \quad (2.1)$$

a obvykle pôsobí v osiach telesa x , y a z , preto $\mathbf{a}[a_x, a_y, a_z]^T$, T označuje transponované. Pre meranie sa často používajú jednoosé snímače, preto potrebujeme tri, každý na snímanie jednej osi.

Výraz SFS sa používa preto, lebo tento snímač nemeria priamo akceleráciu. To je najlepšie ukázané na príklade, keď teleso vybavené akcelerometrom padá voľným pádom. Kým vozidlo jasne zrýchli na $g = 9,8 \text{ m/s}^2$, akcelerometer má na výstupe nulu. Dôvod je ten, že gravitačná sila pôsobí na každú časť akcelerometra rovnako, či už na vnútorné časti alebo na vonkajší obal. [5]

Špecifické sily a gravitačná sila sú zhodné len v prostredí bez gravitácie a také v našej sústave neexistuje. Takže v každej situácii, keď čítame z akcelerometra, treba identifikovať inerciálne sily bez gravitačnej sily alebo jej prejavu spôsobeným náklonom telesa s ohľadom na aktuálnu polohu.[5]

2.1.2 Príklad síl pôsobiacich na akcelerometer [5]

Predstavme si teleso o hmotnosti M , ktoré sa pohybuje rýchlosťou V a uhlovou rýchlosťou Ω . Z druhého Newtonovho zákona dostávame

$$\mathbf{F} = \frac{d}{dt}(M\mathbf{V}) = \frac{dM}{dt}\mathbf{V} + \frac{d\mathbf{V}}{dt}M \quad (2.2)$$

za predpokladu, že M je konštantné je prvý člen nulový, z toho vyplýva, že sila F je závislá len na druhom člene, konkrétne,

$$F = M \frac{dV}{dt} = \mathbf{l}_v M \frac{dV}{dt} + M(\mathbf{O}xV) \quad (2.3),$$

kde $\mathbf{l}_v(i, j, k)^T$ je jednotkový vektor s členmi i, j, k v osiach x, y, z . Podelením hmotnosťou M dostávame vektor zrýchlenia

$$\mathbf{a} = \mathbf{l}_v \frac{dV}{dt} + \mathbf{O}xV \quad (2.4)$$

Prvý term reprezentuje tangenciálne zrýchlenie. Druhý term, sa často nazýva Coriolisove zrýchlenie. Hovoríme o ňom pri pohybe v rotujúcej sústave. Jeho veľkosť a smer sú dané vektorovým súčinom uhlovej rýchlosti $\mathbf{\Omega}$ a vektora rýchlosti \mathbf{V} v inerciálnej sústave. A tak,

$$\mathbf{V} = iU + jV + kW \quad (2.5)$$

$$\mathbf{O} = iP + jQ + kR \quad (2.6)$$

Z predošlých zápisov môžeme písať

$$\mathbf{l}_v \frac{dV}{dt} = i\dot{U} + j\dot{V} + k\dot{W} \quad (2.7)$$

$$\mathbf{O}xV = \begin{vmatrix} i & j & k \\ P & Q & R \\ U & V & W \end{vmatrix} = i(QW - RV) + j(RU - PW) + k(PV - QU) \quad (2.8)$$

Označme si

$$\mathbf{F} = iF_x + jF_y + kF_z \quad (2.9)$$

Kombináciou vzorca (2.3) so vzorcami (2.7) a (2.8) a podelením hmotnosťou \mathbf{M} , potom výstupné zrýchlenia akcelerometra \mathbf{a}^n alebo tiež SFS sú

$$\begin{bmatrix} a_x^n \\ a_y^n \\ a_z^n \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \dot{U} + QW - RV \\ \dot{V} + RU - PW \\ \dot{W} + PV - QU \end{bmatrix} \quad (2.10)$$

Pozostávajú z lineárneho zrýchlenia a z dostredivého zrýchlenia spôsobeného nepriamočiarym pohybom telesa (vozidla). Zem sa považuje za plochú a nerotujúcu.

V špeciálnom prípade, teleso s výslednou vertikálnou silou $F_z + W = 0$, a to, $F_z = -W$, a jeden, čo počíta projekciu akcelerácie $a_z = F_z/M = -g$ na osiach x, z, y pomocou Eulerovej transformácie definovanej na obrázku č.2.4:

$$\begin{bmatrix} a_x^n \\ a_y^n \\ a_z^n \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} c\Psi c\theta & s\Psi c\theta & -s\theta \\ (c\Psi s\theta s\phi - s\Psi c\theta) & (s\Psi s\theta s\phi - c\Psi c\theta) & c\theta s\phi \\ (c\Psi s\theta c\phi + s\Psi s\theta) & (s\Psi s\theta c\phi - c\Psi s\theta) & c\theta c\phi \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ -g \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} gs\theta \\ -gc\theta s\phi \\ -gc\theta c\phi \end{bmatrix} \quad (2.11)$$

kde $s(\dots)$ je sinus a $c(\dots)$ cosinus.

Kombináciou (2.10) a (2.11), dostávame celkový vektor špecifickej sily (specific force) v tvare

$$\begin{bmatrix} a_x \\ a_y \\ a_z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} a_x^n \\ a_y^n \\ a_z^n \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} a_x^g \\ a_y^g \\ a_z^g \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \dot{U} + QW - RV \\ \dot{V} + RU - PV \\ \dot{W} + PV - QU \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} gs\theta \\ -gc\theta s\phi \\ -gc\theta c\phi \end{bmatrix} \quad (2.12)$$

Je dôležité si uvedomiť, že meranie na SFS nie je, vo všeobecnosti, totožné s dopravným zrýchlením z pohľadu vonkajšieho pozorovateľa.

Akcelerometre môžeme ďalej deliť podľa rôznych parametrov, ktorými ich bližšie špecifikujeme. Jeden z hlavných parametrov je počet citlivých os. Poznáme jednoosé, dvojosé a trojosé v troch rôznych orientáciách X, Y prípadne Z. Ďalej ich môžeme deliť podľa rozsahu, ktorý sa udáva v g. Takzvané Low g majú rozsah od $\pm 2g$ až $\pm 30g$, Medium g sa pohybujú od $\pm 30g$ do $\pm 100g$, potom sú High g nad $\pm 100g$. Ďalej podľa fyzikálneho princípu, tvaru výstupu atď.

2.1.3 Piezoelektrické akcelerometre [3]

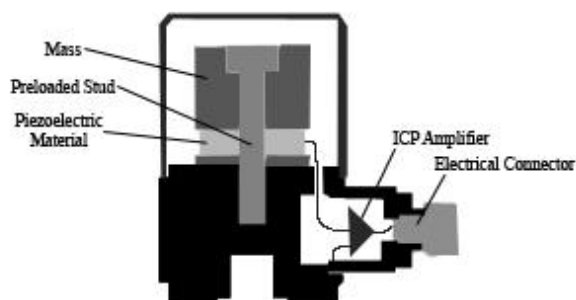
Piezoelektrické akcelerometre vo svojej konštrukcii využívajú piezoelektrický materiál, ktorý generuje náboj úmerný mechanickému namáhaniu vzniknutému pôsobením zrýchlenia. Meranie náboja piezokryštálu prebieha buď priamo pomocou externej elektroniky s vysokou hodnotou vstupnej impedancie, alebo častejšie vnútorná elektronika senzoru konvertuje náboj na napäťový výstup s nízkou impedanciou. Pre spracovanie výstupného signálu zo senzora tak postačuje jednoduchý vyhodnocovací obvod. Nevýhodou týchto akcelerometrov je, že nemôžu byť použité pre meranie frekvencií nižších ako 0,1 Hz.

2.1.3.1 Základný princíp a štruktúra piezoelektrických akcelerometrov

Základ piezoelektrických akcelerometrov tvoria dve časti:

- Piezoelektrický materiál – snímač merajúci zrýchlenie,
- Seizmická hmota – prevádza hodnotu zrýchlenia na silu ($F=m \cdot a$).

Jedna strana piezoelektrického materiálu je pripevnená na pevnú základňu snímača. Časť pomenovaná ako seizmická hmota je pripevnená na piezosnímač. Ak je akcelerometer vystavený zrýchleniu (vibráciám, otrasom), generovaná sila F , ktorá pôsobí na piezoelektrický element, spôsobí vygenerovanie náboja, resp. napätia na výstupe senzora. Podľa Newtonovho zákona je táto sila úmerná pôsobiacemu zrýchleniu a hmotnosti seizmickej hmoty. Piezoelektrický efekt tak generuje na výstupe náboj úmerný pôsobiacej sile. Pretože seizmická hmota má konštantnú hmotnosť, výstupný signál v podobe náboja je úmerný pôsobiacemu zrýchleniu. Vlastnosti akcelerometra sú charakterizované nábojovou citlivosťou, resp. napäťovou citlivosťou.



Obrázok č. 2.1 Prierez piezoelektrickým akcelerometrom [7]

U reálnych piezoelektrických akcelerometrov samozrejme existujú limity meraní. U tohto druhu senzora je možné merať zrýchlenie len v platnom frekvenčnom rozsahu, ktorý je daný konkrétnou konštrukciou senzora, pretože citlivosť je u niektorých typov významne závislá na frekvencii. Z tohto pohľadu môže byť piezoelektrický akcelerometer považovaný za pásmovú priepusť s rezonančnou špičkou. Seizmická hmota a piezokeramika formujú pružnú hmotu systému, ktorý sa tak chová ako pružina s vlastnou rezonanciou, a tak definuje frekvenčné limity akcelerometra. Aby bol dosiahnutý širší pracovný rozsah, mala by byť rezonančná frekvencia pružnej hmoty čo najväčšia. To sa dá doceliť ubratím seizmickej hmoty, čo naopak znižuje citlivosť senzora.

2.1.4 Piezorezistívne akcelerometre [8]

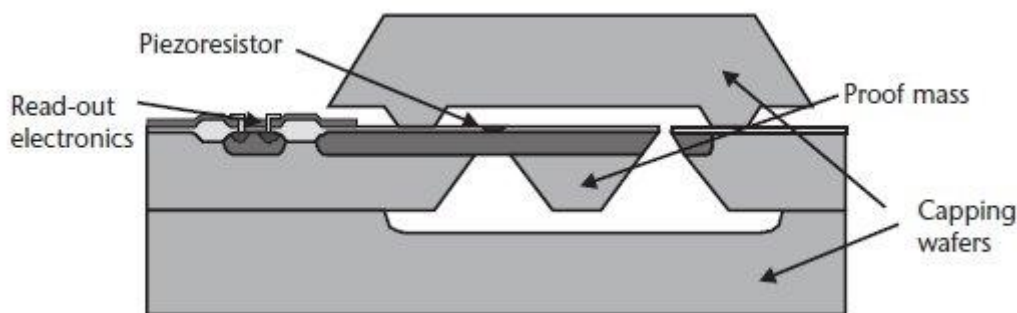
Akcelerometre využívajú zmenu odporu vhodného deformačného člena spojeného so zotrvačnou hmotou. Pri mechanickom namáhaní vzniknutého pôsobiacim zrýchlením vzniká mechanické napätie, ktoré je merané pomocou polovodičových tenzometrov. Jednoduchá konštrukcia výstupu umožňuje napojiť snímač na jednoduchý vyhodnocovací obvod. Piezorezistívny akcelerometer je snímač, ktorý využíva piezorezistívny materiál namiesto piezoelektrického kryštálu a jeho prostredníctvom prevádza silu vzniknutú urýchľovanou hmotou na zmenu odporu. V integrovaných piezorezistívnych akcelerometroch sa využíva sieť vyleptaných meracích piezorezistívnych snímačov zapojených do wheatstonovho mostíka. Piezorezistívne akcelerometre majú tú výhodu oproti piezoelektrickým, že môžu merať aj nemenné (statické) zrýchlenie, t.j. od 0 Hz.

Dnes najpoužívanější princíp, využívaný v akcelerometroch je založený na použití ohybu jedného konzolového nosníka z piezorezistívneho materiálu vplyvom pôsobiaceho zrýchlenia. Ohybom sa tak mení odpor, ktorý je následne meraný.

Piezorezistívne akcelerometre v súčasnej dobe disponujú vlastnosťami ako sú malá veľkosť, veľká šírka pásma, stabilný výstup počas celého rozsahu prevádzkových teplôt, veľká presnosť, lineárny výstup, vysoká spoľahlivosť a nízka cena.

2.1.4.1 Základný princíp a štruktúra piezorezistívnych akcelerometrov

Zavesená hmota integrovaného piezorezistívneho akcelerometra nie je nič iné ako záťaž na pružine pripevnená k rámu. Keď sa rám pohne, hmota bude mať tendenciu zostať v kľude, až do doby, kedy pružina predá dostatok sily hmote k pohybu. Sila pôsobiaca na pružinu je úmerná deformácii, ktorá je ďalej priamo úmerná meranému zrýchleniu. V prípade kremíkových akcelerometrov je tento systém predstavovaný kremíkovým konzolovým nosníkom s kremíkovou zotrvačnou hmotou na voľnom konci. Mechanické napätie, spôsobené ohybom zotrvačnej hmoty pri zrýchlení je koncentrované na povrchu nosníka, kde je merané polovodičovými tenzometrami. Tie sú umiestnené blízko pevného konca nosníka, kde je mechanické napätie maximálne.



Obrázok č. 2.2 Prierez akcelerometrom s piezorezistívnym princípom[7]

Horná hranica frekvenčného rozsahu je určená prvou rezonančnou frekvenciou celej mechanickej štruktúry, tlmenia nosníka a nelinearitou akcelerometra. Ak sa meraná frekvencia zrýchlenia priblíži k rezonančnej frekvencii akcelerometra dochádza k väčšej chybe merania. Pri prekročení rezonančnej frekvencie je akcelerometer ako snímač zrýchlenia nepoužiteľný.

Od akcelerometra sa očakáva, že bude citlivý len na zrýchlenie v požadovanom smere. Napríklad akcelerometer merajúci v ose X, meria parazitne aj v rovine Y a Z. Táto nevyžadovaná citlivosť sa označuje ako priečna citlivosť (cross-sensitivity), ktorá spôsobuje chybu merania. Vyjadruje sa pomerom citlivosti v nepožadovaných smeroch voči smeru požadovanému. Ak je veľkosť nosníka väčšia ako hrúbka nosníka, potom mechanické napätie vzniknuté ohybom spôsobeným priečnym zrýchlením bude značne menšie, než napätie vyvolané zrýchlením v požadovanej osi a hodnota priečnej citlivosti tak bude malá.

Akcelerometre používané v priemysle sú často uspořádané na veľkú citlivosť vibrácií a nárazov. Aj keď šírka pásma, priečna citlivosť a ochrana proti preťaženiu

sú kritické hodnoty pre nasadenie v aplikáciách, pre niektoré aplikácie, ako napríklad snímanie nárazu v airbagu automobilu je pre nich dôležitá aj schopnosť samo testovania. V týchto aplikáciách je nutné overovať funkciu akcelerometra, a získať tak spoľahlivú informáciu o jeho funkčnosti. Automatické testovanie v prípade piezorezistívneho akcelerometra môže byť jednoducho realizované, pretože malá hmotnosť snímačej hmoty môže byť jednoducho vychýlená malou elektrickou silou k dorazom. Tým sa simuluje sila pôsobiaca na štruktúru vplyvom zrýchlenia. Výstupný signál môže byť následne vyhodnotený a podľa neho môže byť prevedená teplotná kompenzácia a kalibrácia citlivosti.

Výhodou piezorezistívnych akcelerometrov je spodná hranica merateľnosti a veľká citlivosť. Nevýhodou je významná závislosť výstupu na teplote, ktorú je možné čiastočne kompenzovať samočinným testovaním. Typickým predstaviteľom piezorezistívnych akcelerometrov je senzor Endevco 7264, ktorý sa úspešne využíva v oblasti automobilovej bezpečnosti a priemyselných aplikáciách.

2.1.5 Tepelné akcelerometre [8]

Tepelné akcelerometre využívajú zmenu prenosu tepla klúdového a prúdiaceho vzduchu, na ktorý pôsobí zrýchlenie. Konštrukčne senzor neobsahuje žiadne mechanické pohyblivé časti, je tak veľmi odolný a vydrží bez ujmy zrýchlenie až 50 000g. Akcelerometre majú veľký prevádzkový teplotný rozsah a sú dosť citlivé na okolitú zmenu teploty.

2.1.5.1 Základný princíp a štruktúra tepelných akcelerometrov

Tepelné akcelerometre využívajú základný fyzikálny princíp, ktorý sa v podobnej verzii používa v kalorických prietokomeroch. Ide o prenos tepla v plyne a snímanie rozloženia teploty v okolí zdroja tepla. Vykurovacie teleso zahrieva okolitý vzduch vo vzduchovej komore na konštantnú teplotu. Rozloženie teploty v závislosti na vzdialenosti od vykurovacieho telesa je merané teplotnými snímačmi. Tie sú realizované sústavou termočlánkov umiestnených v pravidelných rozstupoch. Celá táto sústava je implementovaná v kremíkovom substráte. Celý senzor vrátane vyhodnocovacej elektroniky je plne integrovaný na jednom čipe CMOS v jednom puzdre.

V klúdovom stave akcelerometra, ak nedochádza k žiadnemu pohybu samotného senzoru, je zahriaty vzduch rovnomerne rozložený okolo vykurovacieho telieska. Pokiaľ sa akcelerometer začne pohybovať, t.j. vznikne zrýchlenie v osiach X alebo Y, dochádza vplyvom zotrvačnosti vzduchu k jeho posunutiu voči pohybujúcej sa komore. Prakticky tak dochádza k posunu oblaku zahriateho vzduchu proti smeru pohybu snímača. Vplyvom tohto javu sa krátkodobo zmení rozloženie teploty meranej

teplotnými snímačmi a vzniká tak teplotný rozdiel oproti kludovému stavu. Z priestorového poklesu alebo nárastu teploty je možné zistiť smer pohybu a z teplotného rozdielu rýchlosť pohybu alebo veľkosť zrýchlenia. Z princípu merania teploty vyplýva, že je možné merať pohyb len v dvoch osiach, pretože rozloženie teploty sa meria len plošne.

Veľkým problémom a nevýhodou uvedeného princípu je veľký vplyv zmeny okolitej teploty na citlivosť. Teplota v dutine senzoru je nastavená s ohľadom na konkrétne ochladzovanie stenami, ktoré sú v kontakte s okolitým vzduchom. Pokiaľ sa okolitá teplota zvýši alebo zníži bude aj vzduch v dutine viac zahrievaný alebo ochladzovaný a teda aj rozdiel snímanej teploty nebude odpovedať len zrýchleniu snímača. K vylúčeniu tohto javu sa využívajú rôzne spôsoby. Veľmi častá je kompenzácia externým snímačom teploty. Niektoré akcelerometre majú na čipe umiestnený pre tento účel vlastný teplotný snímač, ktorý má vyvedené vonkajšie vývody a umožňuje tak previesť vlastnú kompenzáciu.

Teplotné akcelerometre patria svojou konštrukciou k najspoľahlivejším senzorom zrýchlenia. Meranie pohybu pomocou prenosu tepla totiž prakticky neumožňuje senzor zničiť preťažením, t.j. vystavením ho príliš veľkej hodnote zrýchlenia. Táto vlastnosť je však zaplatená veľkým vplyvom okolitej teploty na citlivosť senzora. To je obvyklé nutné kompenzovať ďalším teplotným senzorom, ktorý je niekedy umiestnený na čipe akcelerometra. Tepelné akcelerometre sa vyznačujú nízkym medzným kmitočtom. Je odolný voči vibráciám, nárazom, ktoré presahujú merací rozsah akcelerometra.

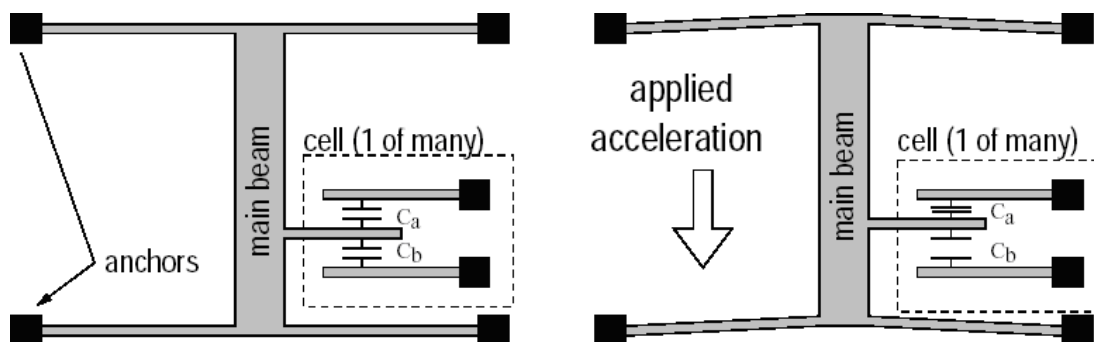
2.1.6 Kapacitné akcelerometre

Snímače zrýchlenia pracujúce na kapacitnom princípe snímajú zmenu kapacity spôsobenú pohybom kremíkovej elektródy, ktorá predstavuje zotrvačnú hmotnosť. Tieto snímače sú implementované napríklad v automobilovom priemysle, riadení, navigácii, atď. Vyznačujú sa dobrou citlivosťou (mV/g) a väčším rozlíšením ako podobné piezorezistívne akcelerometre. Pre väčšinu komerčných aplikácií, kde sa využívajú kapacitné akcelerometre, je maximálna úroveň snímania g (MGSL) okolo 500g. Avšak v mnohých aplikáciách, kde sa nachádzajú vysoké zrýchlenia, ktoré sú niekoľkokrát vyššie ako MGSL akcelerometra. Napríklad pri monitorovaní maximálneho zrýchlenia v hard disku môže zrýchlenie dosahovať až 10 kg.[9]

Doba odozvy snímača po prekročení vysoko nad rámec jeho MGSL je tiež dôležitá v mnohých aplikáciách. Kapacitné akcelerometre sa ďalej môžu deliť podľa princípu na kapacitné s otvorenou a slučkou prípadne na kapacitné so spätnou väzbou. [9]

2.1.6.1 Základný princíp a štruktúra kapacitných akcelerometrov

V kapacitných akcelerometroch sa zmenou polohy závažia mení geometria plôch kondenzátora. Výsledné zrýchlenie získavame prevodom zmeny kapacity na zrýchlenie, ktoré je jej úmerné.[6]



Obrázok č. 2.3 Princíp funkcie kapacitného akcelerometra [6]

Ako vidieť na obrázku zotrvačná hmota je po oboch stranách uchytené pružinami a sú z neho vyvedené vodivé dosky pod pravým uhlom. Tie sú symetricky umiestnené po oboch stranách hranolčka tvoriaceho závažie.

Stredové dosky sú umiestnené medzi párom vodivých elektród symetricky po oboch stranách. Spolu tvoria kapacitný delič. Elektródy sú pripojené na harmonický signál rovnakej amplitúdy, ale opačnej polarity s frekvenciou 1 MHz.

Ak na snímač nepôsobí vonkajšia sila, tak sú obe kapacity rovnaké a na stredovej doske by malo byť 0 V. Keď začne pôsobiť na snímač vonkajšia sila stredová doska sa vychýli spolu s hranolom proti pôsobeniu zrýchlenia smerom k jednej z elektród, tým sa posilní kapacitná väzba. Potom môžeme na stredovej doske detekovať napätie. [6]

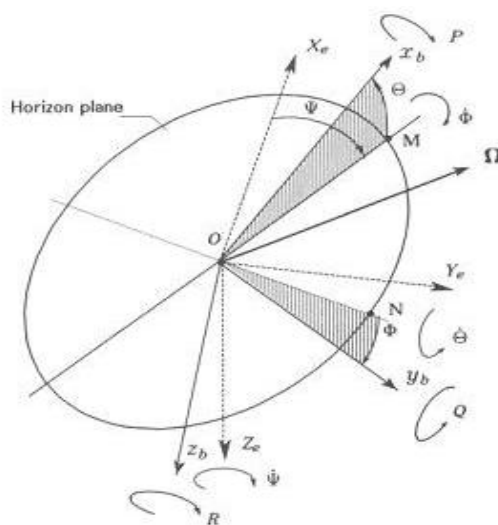
2.2 Gyroskopy

2.2.1 Princíp gyroskopu

Typická veličina, ktorá sa meria pri inerciálnych snímačoch natočenia je Eulerov uhol natočenia telesa. Tieto uhly sa označujú Φ , Θ , a Ψ a sú definované s ohľadom na aktuálnu polohu a inerciálny uhol natočenia telesa označovaný P, Q a R. Rozloženie uhlov je zobrazené na obrázku 2.4. Transformácia každej zo zemských os X_e , Y_e , Z_e , do os inerciálnej navigácie x_b , y_b , z_b je realizovaná pomocou Eulerovej transformácie, ktorá je formulovaná podrobne v literatúre [5].

Je dôležité si uvedomiť, že hodnoty inerciálnych uhlov P, Q, R nie sú identické s Eulerovými hodnotami uhlov Φ, Ψ, Θ . Prvá trojica predstavuje hodnotu celkového vektora inerciálnej uhlovej rýchlosti Ω v osiach telesa x_b , y_b , z_b zatiaľ, čo Φ, Ψ, Θ reprezentujú Eulerove uhlovú rýchlosť c osiach X_e , Y_e a Z_e .

Kinematická závislosť medzi P , Q , R a $\dot{\Phi}$, $\dot{\Psi}$, $\dot{\Theta}$ je známa ako Eulerove diferenciálne rovnice, ktoré sú uvedené vo vzorcoch 2.13 až 2.18.



Obrázok č. 2.4 Rotácia zemských os a os telesa [5]

$$P = \dot{\Phi} - \dot{\Psi} \sin \Theta \quad (2.13)$$

$$Q = \dot{\Theta} \cos \Phi - \dot{\Psi} \cos \Theta \sin \Phi \quad (2.14)$$

$$R = -\dot{\Theta} \sin \Phi + \dot{\Psi} \sin \Theta \cos \Phi \quad (2.15)$$

Pre obrátené poradie platí

$$\dot{\Phi} = P + Q \sin \Phi \tan \Theta + R \cos \Phi \tan \Theta \quad (2.16)$$

$$\dot{\Theta} = Q \cos \Phi - R \sin \Phi \quad (2.17)$$

$$\dot{\Psi} = Q \frac{\sin \Phi}{\cos \Theta} + R \frac{\cos \Phi}{\cos \Theta} \quad (2.18)$$

Gyroskopy sú snímače, ktoré sa používajú na stanovenie uhlovej rýchlosti a veľkosti rotácie. Hodnota sa udáva v °/s.

Rozdelenie podľa použitia:

- meranie náklonu,
- spresňovanie hodnoty GPS navigácií,
- stabilizácia predmetov prípadne obrazu,
- meranie zotrvačnosti,
- atď.

Základný vzťah popisujúci chovanie gyroskopov

$$\tau = \frac{d\vec{L}}{dt} = \frac{dI\vec{\omega}}{dt} = I\vec{\alpha} \quad (2.19)$$

τ , \vec{L} - vektor točivého momentu gyroskopu a vektor uhlového momentu,

I - moment zotrvačnosti (skalár) ($\text{kg}\cdot\text{m}^2$)

ω - vektor uhlovej rýchlosti (rad/s)

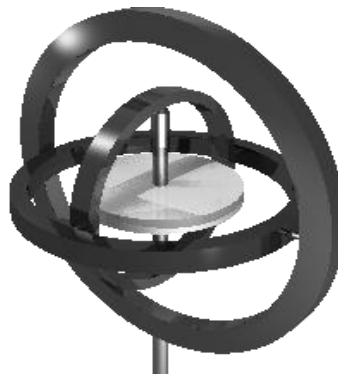
α - vektor uhlového zrýchlenia (rad/s^2).

Podľa fyzikálneho princípu môžeme gyroskopy rozdeliť na:

- mechanické,
- kvantové,
- MEMS gyroskopy,
- optické,
- laserové.

2.2.2 Mechanický gyroskop

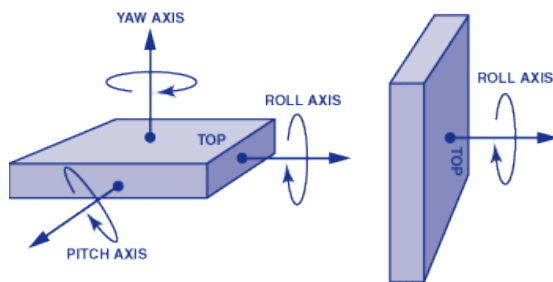
Gyroskop alebo gyroteodolit je prístroj k priamemu určovaniu azimutu v zvolených smeroch. Je to teleso tvaru kovového prstenca, prípadne kovovej dosky rotujúcej okolo osy na toto teleso kolmej. Ak nie je gyroskop ovplyvnený vonkajšími silami, tak udržiava jeho rotačná os v priestore stály smer. Zotrvačník na pohyb reaguje tak, že sa snaží vyrovnať svoju rotačnú os s rotačnou osou Zeme.



Obrázok č. 2.5 Mechanický gyroskop [10]

2.2.3 MEMS gyroskopy

Takmer všetky gyroskopy využívajú na meranie rotácie vibračné mechanické prvky. Žiadne rotačné časti, ktoré využívajú ložiská, čo umožňuje ich miniaturizovať a pomocou techniky mikroobrábania vyrábať vo veľkých množstvách. Všetky vibračné gyroskopy sú založené na prenose energie medzi dvoma vibračnými režimami štruktúry, spôsobeným Coriolisovým zrýchlením. [16]



Obrázok č. 2.6 Spôsoby natočenia a rotácie gyroskopov [11]

2.2.3.1 Coriolisova sila

Coriolisova sila je tzv. virtuálna sila, ktorá pôsobí na ľubovoľný hmotný predmet alebo objekt, ktorý sa pohybuje rýchlosťou \mathbf{v} v sústave rotujúcej okolo osy rotácie uhlovou rýchlosťou $\boldsymbol{\omega}$.

Vzťah pre vektor Coriolisovej sily:

$$\vec{F}_c = 2m\vec{v} \times \vec{\omega} \quad (2.20)$$

F_c – Coriolisova sila,

m – hmotnosť telesa (kg),

\mathbf{v} – vektor rýchlosti telesa (ms^{-1}),

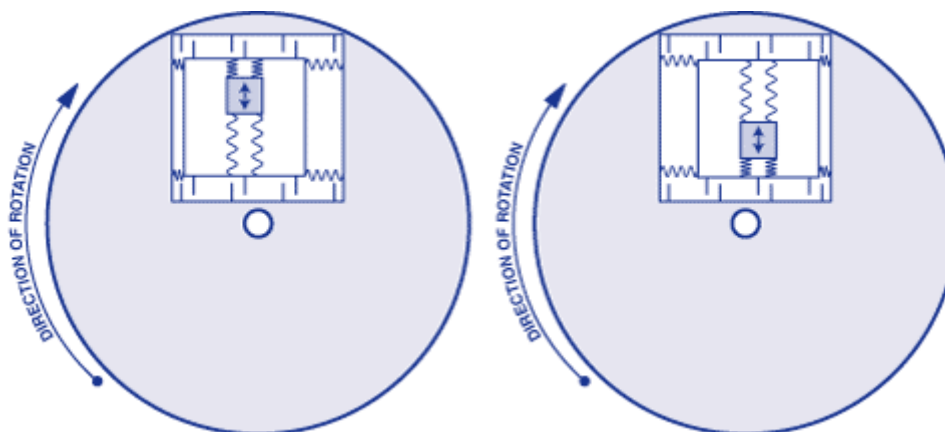
$\boldsymbol{\omega}$ – vektor uhlovej rýchlosti otáčania sústavy (rad.s^{-1}).

Veľkosť Coriolisovej sily potom môžeme určiť pomocou vzorca 2.21.

$$F_c = 2mv\omega \sin \theta \quad (2.21)$$

θ predstavuje uhol zovretý medzi vektorom uhlovej rýchlosti a vektorom rýchlosti. V prípade pohybu po Zemi sa jedná o zemepisnú šírku.

Coriolisova sila hrá podstatnú úlohu na Zemi, vďaka jej rotácii okolo vlastnej osy. Každé teleso, ktoré sa po povrchu Zeme pohybuje rýchlosťou \mathbf{v} , je vplyvom Coriolisovej sily otáčané do svojho pôvodného smeru. Na severnej pologuli stáča táto sila všetky pohybujúce sa telesa smerom vpravo od ich pôvodného smeru a na južnej pologuli opačne, čiže vľavo. Na rovníku je Coriolisova sila nulová. [8,9]

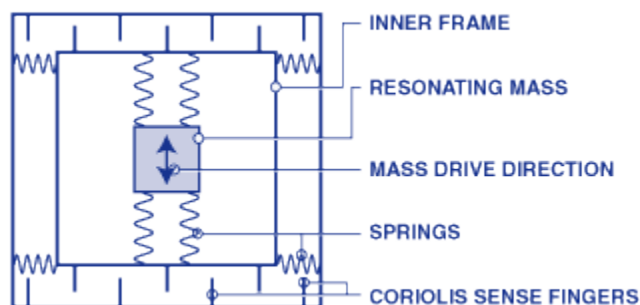


Obrázok č. 2.7 Príklad pôsobenia Coriolisovej sily [11]

Ak sa pohybuje teleso na severnej pologuli na východ, má Coriolisova sila smer odstredivej sily, čo znamená, že teleso stráca časť tiaže. Naopak pri pohybe z východu na západ, má Coriolisova sila smer sily dostredivej, čiže teleso časť tiaže získa navyše.

2.2.3.2 Základný princíp a štruktúra MEMS gyroskopov

Pri praktickom použití Coriolisovej sily v integrovaných gyroskopoch sa využíva technológia MEMS, kde sa vytvárajú na chipe spolu s elektrickými obvodmi aj mechanické mikrosúčiastky, ktoré tvoria samotný snímač. Štruktúra závisí od výrobcu, princíp zostáva vo všeobecnosti rovnaký a je znázornený na obrázku č.2.8.



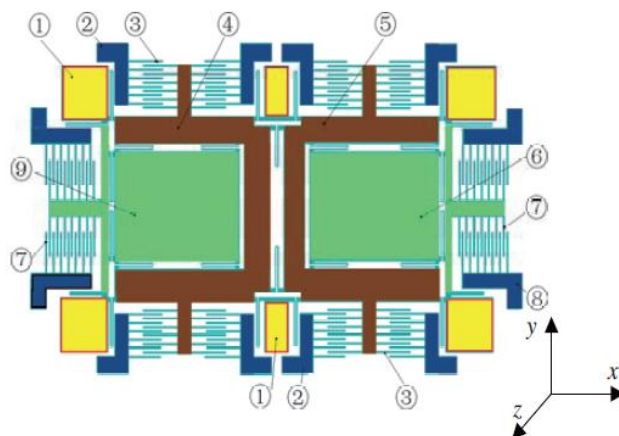
Obrázok č. 2.8 Zjednodušená schéma MEMS gyroskopu [11]

Základ tvorí rezonujúca štruktúra (resonating mass) upevnená v ráme (inner frame), ktorá sa vplyvom vlastnej mechanickej rezonancie, na obrázku predstavovanej pružinami (springs), pohybuje v uvedenom smere (Mass drive direction) kolmom na smer otáčania, ako zobrazuje obrázok č.2.7. Pritom vzniká Coriolisova sila úmerná uhlovej rýchlosti otáčania, ktorá stláča vonkajšie pružiny rámu a spôsobuje vzájomný posun meracích plôch (Coriolis sense fingers) fungujúci ako elektródy vzduchových kondenzátorov. Na výstupe je zmena kapacity, ktorá je úmerná uhlovej rýchlosti otáčania $^{\circ}/s$.

2.2.3.3 Dual Mass MEMS gyroskop

Kremíkové mikro-mechanicky obrábané gyroskopy s dvoma seizmickými hmotnosťami sú viac praktické ako gyroskopy s jednou seizmickou hmotnosťou. Sú odolnejšie voči okolitému rušeniu. Ich diferenciálny vstup dokáže efektívne potlačiť súhlasné rušenie. Dual mass gyroskop, s metódou dvojitej štruktúry bol navrhnutý k odstráneniu problému oddelenia snímacej a riadiacej časti gyroskopu.[14]

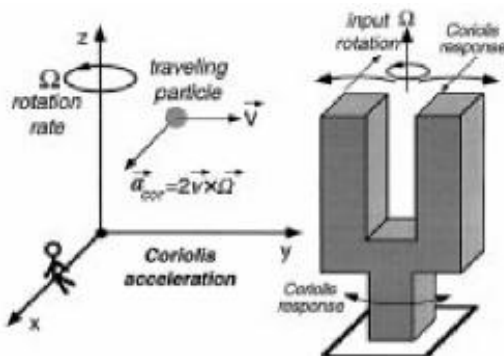
Gyroskop stále obsahuje kvadraturnú chybu, ktorá je spôsobená výrobnými nedokonalosťami. V dôsledku toho je nevyhnutné mať pre dual mass gyroskop určitý druh riadenia pre zníženie týchto nedokonalostí. Často sa využíva adaptívne riadenie. [15]



Obrázok č. 2.9 Dual Mass gyroskop[15]

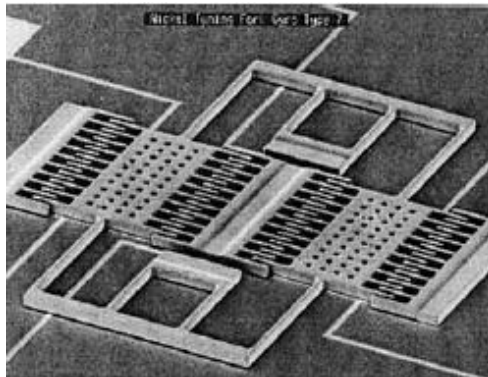
2.2.3.4 Tuning fork gyroskop

Jeden z najviac používaných MEMS gyroskopov je Tuning Fork gyroskop. Dizajn pozostáva z dvoch tetív spojených do uzla, ktorý rezonuje podľa danej amplitúdy. Keď tetivy začnú rotovať, Coriolisova sila začne vytvárať silu, ktorá pôsobí silou kolmo k tetivám vidlice. Sila je následne detekovaná ladičkou prípadne torznou silou. ako je zobrazené na obrázku č.2.10.



Obrázok č. 2.10 Fyzikálny princíp tuning fork gyroskopu[16]

Tieto sily sú úmerné vyvinutej uhlovej rýchlosti, z ktorej následne môžeme merať zmenu polohy gyroskopu pomocou kapacity. Na zistenie sily sa môže použiť elektrostatický, elektromagnetický alebo piezoelektrický mechanizmus.[16]



Obrázok č. 2.11 Tuning fork gyroskop[16]

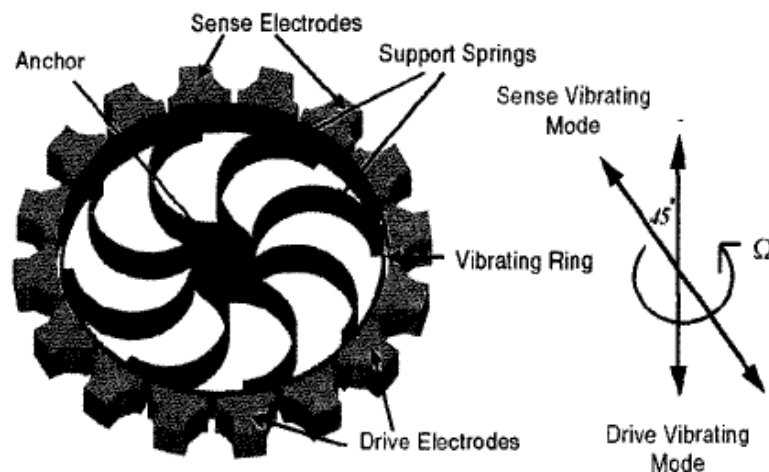
Na obrázku č.2.11 je zobrazený prvý tuning gyroskop, ktorý pochádza z laboratórií Charles Stark Draper Lab. Prvý MEMS tuning gyroskop, pre komerčné využitie, bol vyvinutý pre automobilový priemysel. Gyroskop mal drift $1^\circ/\text{hr}$ a rozlíšenie dosahoval $4000^\circ/\text{hr}$.

2.2.3.5 Ring gyroskop

Ring gyroskopy majú všestranné použitie. Pre zvýšenie ich citlivosti, sa musí čo najviac znížiť rozdiel medzi rezonančnými frekvenciami pohonu a snímacej časti. Každopádne, väčšina vibračných gyroskopov potrebuje mechanické orezávanie na doladenie a vykazujú veľké teplotné výkyvy vďaka nezhode frekvenčných módo.

Ring gyroskop, zobrazený na obrázku č.2.12, pracujúci v dvoch degeneračných ohybových módoch, má vnútorný režim párovania. [17]

Prvý niklový vibračný ring gyroskop bol dokumentovaný v roku 1994 a mal rozlíšenie $0,5^\circ/\text{s}$. Nevýhoda týchto gyroskopov bola malá vibračná hmota a nízka hodnota zmeny kapacity pri snímaní. Pre ďalšie zlepšenie výkonu ring gyroskopu, na rozlíšenie 1 až $10^\circ/\text{hod}$, je potrebné zvýšiť nízku zmenu kapacity pri snímaní. (1 1 1) orientovaný SCS ring s vysokým pomerom strán podporovaný skleneným substrátom, poskytuje gyroskopu schopnosť dosiahnuť vyššiu citlivosť. [17]



Obrázok č. 2.12 Štruktúra Ring gyroskopu [17]

2.2.4 Optický gyroskop

Optické gyroskopy sú založené na princípe Sagnacovho javu. Môžeme ich rozdeliť na dve skupiny:

- Laserové – pri rotácii dochádza na optickej dráhe ku zmene frekvencie
- Vláknové – pri rotácii dochádza na optickej dráhe k fázovému posunu

2.3 Chyby inerciálnych snímačov

2.3.1 Bias

Bias gyroskopu alebo akcelerometra je priemer, ktorý sa určí za definovaný čas, kedy sa meria výstup akcelerometra prípadne gyroskopu za definovaných podmienok, ktoré nemajú žiadnu koreláciu so vstupným zrýchlením alebo rotáciou.

Bias (skreslenie, prípadne posunutie nuly) gyroskopu je zvyčajne vyjadrený v stupňoch za hodinu ($^{\circ}/h$), alebo radiánoch za sekundu (rad/s). Skreslenie akcelerometra sa vyjadruje v metroch za sekundu na mínus druhú (m/s^2) alebo v g. Vo všeobecnosti sa bias skladá z dvoch častí. Prvá je deterministická zložka nazývaná bias offset (skreslenie jednosmernej zložky) a druhá je náhodná časť (random part). Bias offset, ktorý referuje k ofsetu, ktorý produkuje pri meraní inerciálny snímač, je deterministický a môže byť určený pomocou kalibrácie. Náhodná časť sa tiež nazýva bias drift a tá referuje k rýchlosti, pri ktorej sa akumuluje chyba v inerciálnom snímači s časom, t.j. náhodne sa mení v čase. Bias drift a neurčitosť výstupu snímača sú náhodné a mali by byť modelované ako stochastický proces. Chyby bias môžu byť redukované z referenčných hodnôt, ale to závisí na konkrétnom type a rozsahu merania. [6]

2.3.2 Scale Factor

Scale Factor je pomer zmeny vstupu, ktorý sa má merať. Scale Factor je všeobecne definovaný ako sklon priamky, ktorý môže byť určený pomocou metódy najmenších štvorcov zo vstupno-výstupných dát. Chyba scale factoru má deterministický charakter a môže byť určená pomocou kalibrácie. Asymetria scale factoru (pre gyroskop alebo akcelerometer) je rozdiel medzi meraním s kladným vstupom a medzi meraním so záporným vstupom, špecifikované ako časť scale factoru meraná cez vstupný rozsah. Asymetria scale factoru znamená, že sklon vstupno-výstupnej funkcie je nespojitý za predpokladu nulového vstupu. Je dôležité ju odlišiť od iných nelinearit. [6]

Stabilita scale factoru, čo je schopnosť inerciálneho snímača presne zachytiť uhlovú rýchlosť (alebo zrýchlenie) v rôznych uhloch (alebo pri odlišných zrýchleniach), môže byť tiež použitá na popis scale factoru. Pri stabilite scale factoru sa predpokladá, že znamená zmenu scale factoru s teplotou a jej opakovateľnosti, ktorá je vyjadrená ako časť za milión (ppm). Odchýlky z teoretického rozsahu sú spôsobené nedokonalosťami systému. [6]

2.3.3 Ortogonalita (vychýlenie osí)

Vychýlenie osí je chyba vznikajúca z nedokonalosti upevnenia snímačov. Zvyčajne ústi v neortogonalitu osí definujúcich telo INS rámu. Vo výsledku je každá os ovplyvnená meraniami ostatných dvoch osí v tele rámu. Nesprávne nastavenie osí môže byť vo všeobecnosti vyvážené alebo modelované v INS chybovej rovnici.[6]

2.3.4 Šum

Šum je dodatočný signál ústiaci zo snímača samotného alebo iného elektronického vybavenia, ktoré interferuje so výstupnými signálmi, ktoré sa snažíme merať. Šum je vo všeobecnosti nesystematický a teda nemôže byť odstránený z dát použitím deterministických modelov. Môže teda byť modelovaný iba stochastickými procesmi.[6]

2.4 Meracie modely

2.4.1 Model akcelerometra [3]

Akcelerometer, ako som už vyššie zmienil meria špecifickú silu. Táto hodnota však pozostáva aj z nechcených systematických a nesystematických signálov vyjadrených vo vzorci 2.22.

$$I_f = f + b_{cons} + b_{random} + (S_{cons} + S_{random})f + S_2 f^2 + Nf + \delta g + \varepsilon(f) \quad (2.22)$$

f - skutočná specific force (m/s^2)

b_{cons} - konštantná časť skreslenia, odstránená kalibráciou (m/s^2)

b_{random} - zostávajúca, náhodná časť skreslenia, modeluje sa (m/s^2)

$S_{cons} S_{random}$ - konštantná a náhodná časť lineárneho Scale factoru (ppm, %)

S_2 - nelineárny scale factor (ppm, %)

N - neortogonalita (ppm, %)

δ - gravitačné anomálie, odchýlka od teoretickej gravitácie (m/s^2)

$\varepsilon(f)$ - šum akcelerometra (m/s^2)

2.4.2 Model gyroskopu [3]

Gyroskop je snímač uhlovej rýchlosti, ktorého výstupom je uhlová rýchlosť prípadne uhol (po integrácii). Nasledujúci model, vyjadrený vo vzorci 2.23, reprezentuje jedno osí gyroskop pre meranie uhlovej rýchlosti.

$$I_w = w + b_{cons} + b_{random} + Sw + Nw + \varepsilon(w) \quad (2.23)$$

w - skutočná uhlová rýchlosť ($^\circ/s$)

b_{cons} - konštantná časť skreslenia, odstránená kalibráciou ($^\circ/s$)

b_{random} - zostávajúca, náhodná časť skreslenia, modeluje sa (m/s^2)

S - scale factor gyroskopu (ppm, %)

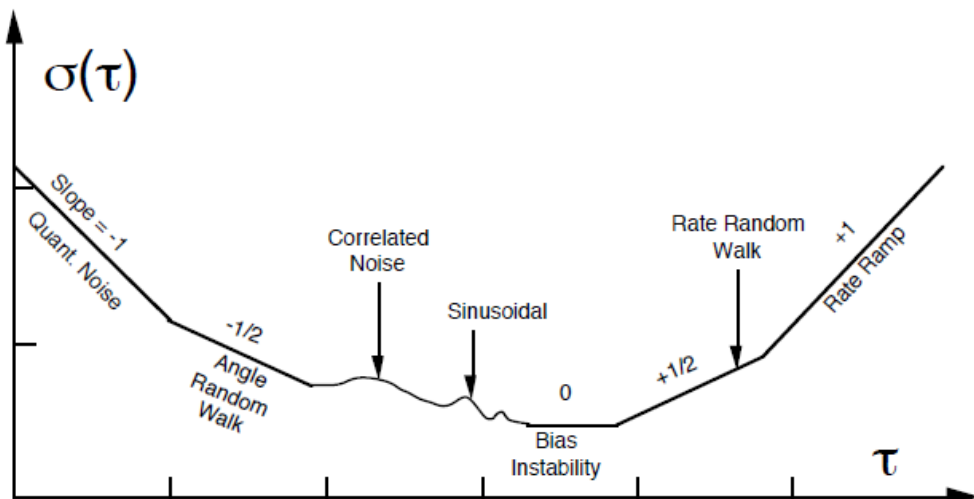
N - neortogonalita gyroskopu (ppm, %)

$\varepsilon(f)$ - šum gyroskopu ($^\circ/s$)

2.5 Allanova odchýlka

Allanova odchýlka je štatistický ukazovateľ podobne ako smerodatná odchýlka. Odhad smerodatnej odchýlky je však funkciou množstva vzoriek N , pre iný ako biely šum nevykazuje správne výsledky. Tieto nedostatky odstraňuje Allanova odchýlka. Bola prijatá ako štandard IEEE pre špecifikáciu stability v časovej doméne.[12]

Podstatné na Allanovej odchýlke je, že je schopná vypovedať aká forma šumu prevláda počas danej priemerovanej periódy τ . Za týmto účelom sa závislosť $\sigma_y(\tau)$ na τ vynáša do tzv. sigma-tau grafu, kde sú na oboch osiach logaritmické súradnice. Predtým je ale nutné z nameraných hodnôt odstrániť systematické chyby (napr. lineárnu závislosť a pod.). Príklad priebehu je na obr.č. 2.12. [12]



Obrázok č. 2.13 Príklad priebehu Allanovej odchýlky [12]

Ako je zrejmé z obrázku, je možné pomocou sklonu určiť jednotlivé hodnoty napríklad ARW, prípadne kvantizačný šum a zároveň určiť v akom čase majú dominanciu. Na nasledujúcich vzorcoch je zobrazený výpočet Allanovej odchýlky.

$$\overline{\Omega_k}(\tau) = \frac{\Theta_{k+m} - \Theta_k}{\tau} \quad (2.24)$$

$$\tau = m\tau_0 \quad (2.25)$$

$$\sigma^2(\tau) = \frac{1}{2\tau^2(N-2m)} \sum_{k=1}^{N-2m} (\Theta_{k+2m} - 2\Theta_{k+m} + \Theta_k)^2 \quad (2.26)$$

Z výsledného priebehu môžeme prepočtom získať konkrétne hodnoty angle random walku, rate random walku prípadne kvantizačného šumu.[13]

2.6 Meranie MEMS akcelerometrov a gyroskopov [1]

2.6.1 Úvod

Filozofia testovania závisí na snímači alebo systéme, ktorý sa má skúmať a na forme testovania. Použitá môže byť ako statická, tak aj dynamická meracia metóda. Pri statických metódach sa snímač pohybovo fixuje (nehýbe sa s ním) a skúma sa vplyv nejakého prirodzeného efektu alebo fenoménu. Napríklad, môžeme merať, špecifickú silu proti zemskej gravitácii pri rôznych orientáciách snímača. Pri dynamických metódach, sa DUT pohybuje so špecificky daným pohybom, napr. rotácia, a skúma sa odozva zariadenia na toto narušenie v porovnaní s podnetom, ktorý bol vykonaný.

Pre definovanie alebo popísanie správania sa snímača môžeme popísať proces, ktorý sa skladá z troch častí:

- Testovanie pomocou jednoduchých metód, kedy sa používajú hlavne statické testy, na určenie alebo overenie základných parametrov snímača, ako

je napríklad jednoduchý statický pozičný test na overenie, že odozva snímača je v súlade s katalógovým listom výrobcu.

- Statické testovanie, prípadne kalibrácia, kedy sa odvodzujú parametre zariadenia za chodu, ako sú napríklad tzv. multiposition testy.
- Treťou časťou sú dynamické testy, kedy sa DUT podrobí pohybu, ako je napríklad uhlová rotácia alebo lineárny pohyb s daným zrýchlením. Táto forma testov špeciálne vybavenie laboratória ako sú rotačné stoly, vibračné stoly a podobne.

Inerciálne snímače, prípadne systémy, sú podrobované rôznym kalibračným a testovacím postupom počas ich vývoja. Pri prototypoch inerciálnych zariadení sa testovacia stratégia zameriava na odhad hraníc výkonu zariadenia, ktorým sa stanovuje, čo je ešte možné bez toho, aby sa zariadenie pokazilo, pretože prototypy sú vo väčšine prípadov finančne náročné a je ich nedostatok. V závislosti na type snímača závisí vybavenie laboratória. V niektorých prípadoch nie sú potrebné sofistikované vybavené laboratória, ale stačí testovať tzv. „na kolene“, s menej vybaveným laboratóriom.

Testovacie metódy sú obvykle postavené tak, aby sa počas jednej série testov menila iba jedna vlastnosť, prípadne odozva, snímača, ktorú chceme pochopiť a charakterizovať. Počas testovania a nasledujúcich fáz je dôležité viesť presné záznamy o dosiahnutých výsledkoch, aby sa následne dali vyhodnotiť.

2.6.2 Testovacie vybavenie

Počas rokov vývoja inerciálnych snímačov sa už veľa rôznych testovacích metód a procedúr priviedlo do stavu, kedy už je zbytočné niečo na nich meniť. Veľa, aj keď nie všetky, potrebujú veľmi špecifické, presné a samozrejme tým pádom aj drahé vybavené laboratória, ktoré sú vo väčšine prípadov vybavované, len za účelom testovania týchto snímačov. Pre umiestnenie laboratórií treba špecifické miesta s minimálnymi vibráciami alebo inými okolitými vplyvmi spôsobujúcimi odchýlky pri meraní, ktoré sú pri meraní inerciálnych snímačov veľmi nežiaduce. Teplota okolia, ako jeden zo základných parametrov, sa takisto presne kontroluje, aj keď na meranie sa často používajú teplotné komory. Použitie počítačov v meracích reťazcoch pre riadenie a analýzu dát posunul meracie metódy hlavne v posledných troch dekádach.

Je dôležité si uvedomiť, že nie je dôležité len dodržať vybavenie a postup danej testovacej metódy, ale aj presnosť zariadení pre danú metódu. Môže sa stať, že prístroje budú mať napríklad vyššiu úroveň šumu ako samotný snímač, tzn. že budeme merať nerelevantné údaje. Toto umožňuje vzhľadom k tomu, že poznáme parametre, ktorými pôsobíme na daný snímač pozorovať zmeny spôsobené týmito vplyvmi. Všeobecne platí zásada, že skúšobné zariadenie má byť schopné merať daný parameter s presnosťou 5 až 10 krát vyššou ako je meraná hodnota na snímači. Paralelne s tým,

zber dát a algoritmus zberu dát musí odpovedať danej presnosti a musí byť kompatibilný s meracím reťazcom. Použité meracie zariadenia by mali byť samozrejme pravidelne kalibrované. Nepresnosť sa potom prenáša do výsledkov, pri ktorých následne vyhodnocujeme dáta, ktoré nie sú spôsobované chybou snímača, ale nepresnosťou meracieho vybavenia. Príkladom je rotačný stôl, ktorý sa časom degraduje, os pohybu sa môže začať pohybovať do kužeľa. Gyroskop, ktorý testujeme, zaznamená tento uhlový pohyb a na výstupe sa neprejaví reálna hodnota danej uhlovej rýchlosti meranej osi, ale aj parazitná hodnota, ktorej hodnota v niektorých prípadoch môže byť vyššia ako meraná veličina.

2.6.3 Zariadenia pre zber dát

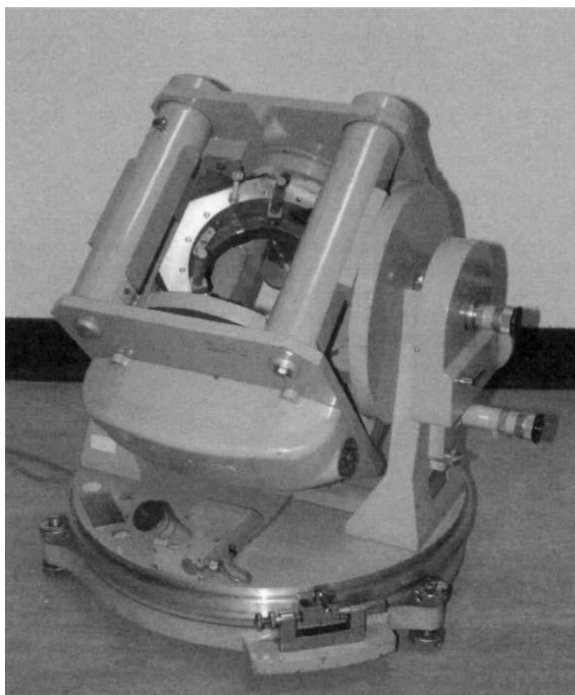
Signály produkované inerciálnymi snímačmi, môžu byť vo viacerých formách, ako napríklad AC prípadne DC, ktoré môžu byť spojité alebo diskrétné. Typ výstupného signálu závisí na type snímača. V závislosti na signáli, ktorý chceme skúmať a na presnosti, ktorú chceme dosiahnuť, sa používa záznam priamo do grafu (zapisovača) alebo nejaká forma digitálneho záznamu. Záznam priamo do grafu sa používa, keď chceme zobrazit' nejaké trendy snímača.

Ďalší spôsob, najčastejší pre presné merania, je použitie digitálneho voltmetra prípadne digitálneho ampérmetra pre monitorovanie požadovaného signálu. Signály sú často integrované po dobu, ktorej dĺžka závisí na teste, a potom uložené vo vhodnej forme obvykle cez dátovú zbernicu na počítač. Je dôležité, aby riešenie celého reťazca pre zber dát malo vyšší rozsah záznamu, ako je hodnota daného snímača o jeden rád. Takisto aj dynamický rozsah a stabilita záznamového príslušenstva, vrátane dátových zberníc, by mala byť vyššia ako u testovaného snímača.

2.6.4 Test stability

Princíp testovania stability spočíva v zistení správania snímača pri opätovnom zapínaní.

Gyroskop sa umiestni na blok s presne daným natočením v niekoľkých uhloch vzhľadom ku zemským osiam a lokálnemu gravitačnému vektoru Zeme. Alternatívne, gyroskop môžeme nastavovať po umiestnení na Grasebyho stôl, čo je stabilizovaný systém na presne ovládanie a nastavovanie uhlov. Grasebyho stôl je zobrazený na obrázku č.2.14. Pre ešte lepšie výsledky sa zariadenie alebo gyroskop umiestňuje na podstavec zo žuly, ktorý má svoje vlastné základy a je vibračne izolovaný od laboratória.



Obrázok č. 2.14 Grasebyho stôl [1]

Gyroskop operuje v presne danej konštantnej teplote a natočenie sa mení štandardne v ôsmich prípadne dvanástich natočeniach. Nastaví sa natočenie, počká sa na ustálenie teploty gyroskopu a následne sa spracuje signál. Počet meraní a dĺžka závisí na presnosti merania.

Pri akcelerometroch sa snímač umiestni na pevnú podložku vždy pod iným uhlom. Príklad citlivých osí korešponduje k 0g, 1g, 0g prípadne -1g, a po opätovnom zapínaní sa testuje výstup. Pomocou tohto testu môžeme zisťovať scale factor, linearitu scale factoru, opakovateľnosť switch-on to switch-on, chybu presnosti osí.

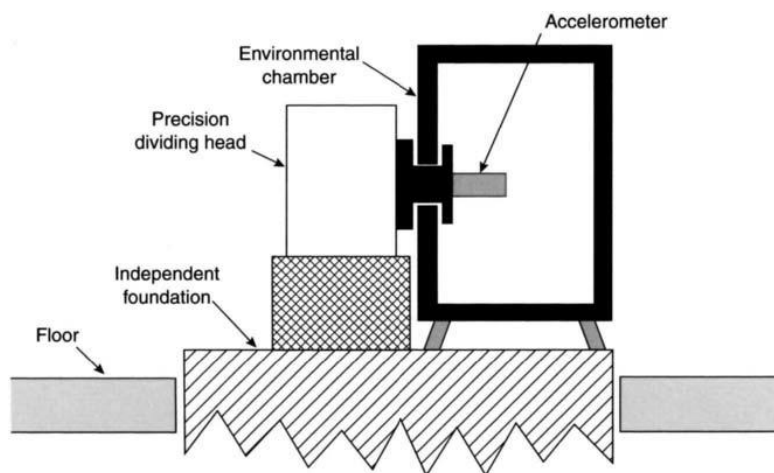
2.6.5 Long-term stability test

Pre tieto testy sa výstupný signál so snímača spracováva vždy vzhľadom ku danému natočeniu. Dĺžka testu sa pohybuje v hodinách, týždňoch a niekedy aj dlhšie. Medzi meraniami sa snímač vždy vypne na určitú dobu predtým, ako sa meranie zopakuje s inou orientáciou alebo sériou natočení. Na každej pozícii sa zaznamenáva aj okolitá zmena teploty, ktorá slúži na korekciu výstupu snímača pri spracovaní.

2.6.6 Teplotný test

Účelom teplotných testov zistiť rozdiely v základných parametroch používaných pre popísanie správania sa snímača, na ktorý vplyva okolitá teplota. Snímač pri teste zvyčajne býva umiestnený na hlave, ktorá sa nachádza v teplotnej komore, ktorá

umožňuje vykonávať testy v rozsahu teplôt hlboko pod bodom mrazu, zvyčajne až do teplôt -55°C a naopak nad bodom mrazu do teplôt okolo 80°C . Typické schematické zapojenie je zobrazené na obrázku č.2.15. Pre gyroskop je zloženie meracieho reťazca podobné, len snímač nie je umiestnený na hlave ale na rotačnom stole, ktorý sa takisto nachádza vo vnútri komory. Pri chladení v komore sa často využíva kyslíčnik uhličitý, preto je vhodné meranie vykonávať v miestnosti s odvetrávaním.



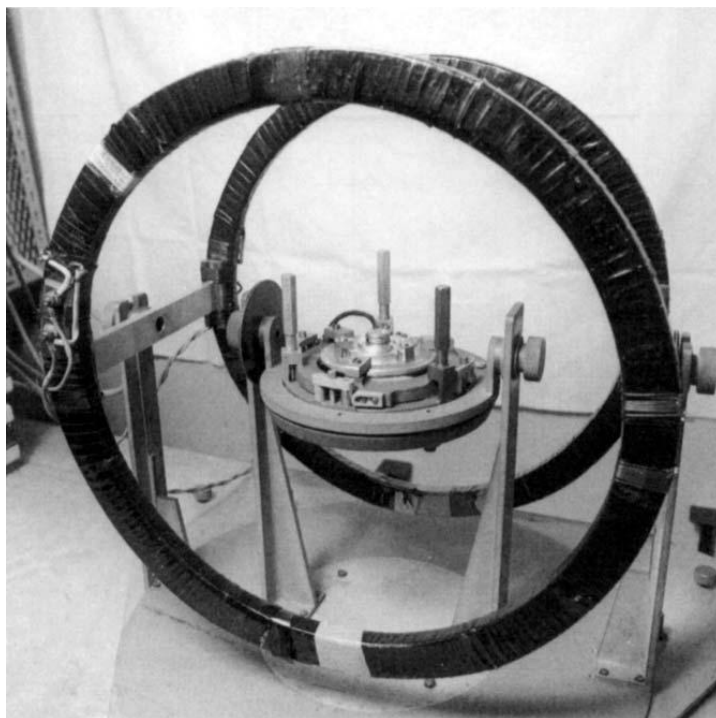
Obrázok č. 2.15 Schematický diagram teplotného testu pre akcelerometer [1]

Odozva akcelerometra môže byť monitorovaná pri rôznych teplotách, pri zvyšovaní alebo znižovaní teploty. V tomto prípade sa akcelerometer nastaví do požadovanej orientácie a okolitá teplota sa prechádza lineárne v danom rozsahu počas určitého stanoveného času. Počas tejto doby sa dáta zaznamenávajú a meranie sa ďalej zopakuje pre inú orientáciu akcelerometra.

Pri snímačoch sa pri tejto technike môže zistiť scale factor snímača pre celý jeho merací rozsah. Každá korelácia s teplotou môže byť matematicky popísaná tzn., že môžeme počas merania môžeme vykonávať online kompenzáciu v prípade, ak inerciálny snímač obsahuje aj snímač teploty.

2.6.7 Test magnetickej citlivosti

Cieľom týchto testov je posúdiť a kvantifikovať vplyv magnetických polí na drift výstupu snímačov. Forma merania je taká istá ako pri teste stability (multiposition test), spomenutým v kapitole 2.6.4. Rozdiel je v pridaní dvoch Helmholtzových cievok, tak ako je znázornené na obrázku č.2.16, ktoré môžu byť umiestnené tak, aby boli pozdĺž každej z hlavných osí testovaného snímača.



Obrázok č. 2.16 Zapojenie s Helmholtzovými cievkami [1]

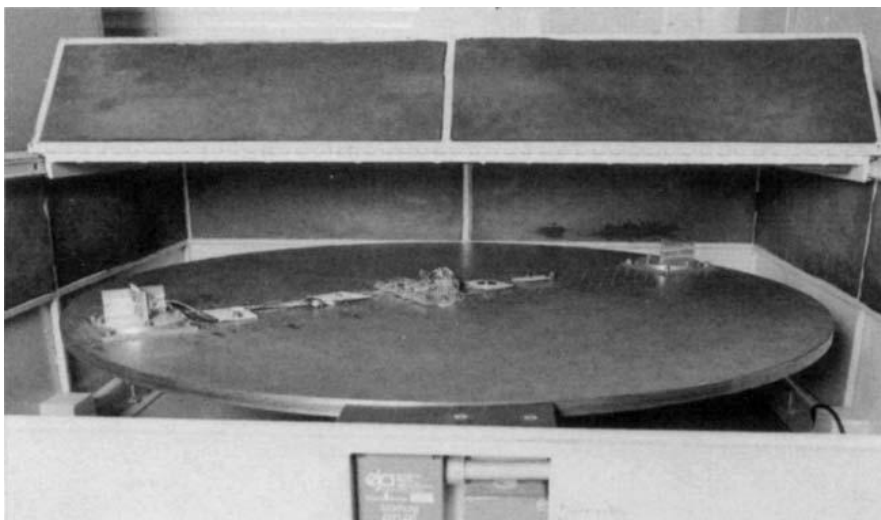
Ako prvé sa zmerajú dáta s jednej sekvencie, pri ktorej sú osi snímača zarovnané vzhľadom ku danej geografickej orientácii a k cievkam. Cievky nie sú napájané. V druhom prípade sa skúška opakuje, kedy cez cievky preteká príslušný prúd, pomocou ktorého vygenerujeme magnetické pole požadovanej veľkosti. Všeobecne platí, že celý rad meraní je vykonaný pre rôzne orientácie magnetického poľa vzhľadom k osiam snímača, v ktorých sa veľkosť magnetického poľa zväčšuje vo vhodných krokoch až na maximálnu hodnotu. Snímač sa počas týchto testov nevypína, aby nedošlo k efektom vznikajúcim pri switch-on to switch-on meraní a samozrejme je dôležité, aby sa snímač pred prvým meraním stabilizoval, kým dôjde ku záznamu dát. Nazbierané dáta sa analyzujú a zisťuje sa priemerná hodnota driftu pre každú sériu testov. Následne sa vykonáva porovnanie priemerných hodnôt za prítomnosti magnetického poľa a bez neho, pre každú orientáciu magnetického poľa na zistenie veľkosti závislosti driftu a orientácie aplikovaného magnetického poľa.

2.6.8 Test na centrifuge

Centrifuga poskytuje použitie veľkého stabilného zrýchlenia alebo kolísavého zrýchlenia na testovaný snímač. Príklad centrifugy používanej na testovanie je na obrázku č.2.17. Účelom testovania na centrifuge je zistiť odozvu snímačov na veľké zrýchlenie a stanoviť schopnosť snímača odolávať veľkému konštantnému prípadne kolísavému zrýchleniu, pričom snímač je buď v kľudovom režime alebo v meracom režime.

Tieto testy sú zvyčajne vykonávané ako jedny z posledných testov, ktoré sa aplikujú na inerciálne snímače, lebo pri ich vykonávaní je kladený veľký dôraz na opatrnosť, aby sa predišlo trvalému poškodeniu snímača. Toto platí hlavne, keď sa zisťujú extrémny použitia snímačov.

Treba dbať na zarovnanie citlivých osí tak, aby nebola prekročená maximálna rotácia gyroskopu a musí byť vytvorená tolerancia na aplikovanú vstupnú hodnotu, ktorá je snímaná gyroskopom. Alternatívne môže byť senzor pripevnený na späť rotujúci stôl pre vynulovanie efektov rotácie centrifugy. Veľkosť zrýchlenia aplikovaného pozdĺž každej osi gyroskopu môže byť ovládaná buď rýchlosťou rotácie alebo vzdialenosťou snímača od stredu rotácie, polomer ramena. Pridanie snímača zrýchlenia vedľa testovaného snímača poskytuje presné meranie zrýchlenia pôsobiaceho na snímač.



Obrázok č. 2.17 Fotografia centrifugy používanej pre testovanie snímačov [1]

Pre zistenie citlivosti gyroskopu na zrýchlenie, sa aplikované zrýchlenie zvyšuje po daných krokoch, až kým sa dosiahne maximum. Tento proces sa opakuje s gyroskopom pripevneným v rôznych osiach pre zistenie citlivosti v rôznych osiach. Porovnanie sa potom vykonáva medzi strednou hodnotou výstupných signálov pre každú akceleráciu, z čoho môžeme následne spočítať citlivosť snímača. Táto hodnota môže byť porovnaná s hodnotou z multi-position testu, ktorý je popísaný vyššie, kde je citlivosť na zrýchlenie počítaná pre nízke hodnoty zrýchlenia.

Pri akcelerometroch sa testuje odozva akcelerometra na veľké zrýchlenie v porovnaní s gravitačným zrýchlením a hodnotenie linearity scale-factora na maximálnych hodnotách vstupného zrýchlenia. Toto meranie môže tiež slúžiť na preverenie odolnosti a tolerancie aplikovaného zrýchlenia presahujúceho odporúčanú alebo maximálnu akceleráciu, pre ktorú bol snímač navrhnutý pre meranie v daných osiach.

2.6.9 Nárazový (Shock) test

Účelom týchto testov je zistiť reakciu snímačov na aplikované vysoké zrýchlenie alebo na vyhodnotenie odolnosti snímača na dané zrýchlenie s krátkou dobou trvania, typicky okolo milisekúnd a s vysokou intenzitou. Podobne ako pri teste na centrifuge, ktorá je popísaná o kapitolu vyššie, snímač môže byť v kľudovom režime prípadne v meracom režime počas testov. Krátkodobé zrýchlenie môže byť vytvorený pomocou vibračného stola alebo tzv. nárazového stola. Ak sa použije nárazový stôl, snímač sa pripevní na ťažký kovový stôl, ktorý sa z presne stanovenej vzdialenosti spustí na vhodne tvarovaný kus olova. V druhom prípade je krátko trvajúce zrýchlenie vyvolané zmenou polohy na vibračnom stole, na ktorom je snímač pevne pripevnený.

Aby bolo možné získať odozvu snímača v prevádzkovom stave, snímač je vhodné orientovaný na stole skúšobného zariadenia a veľmi pevne pripevnený k nemu. Výstupné signály zo snímača sú zaznamenané počas definovanej periódy pred aplikovaním testu. Ak je to možné výstupné signály sú zaznamenané počas merania a počas danej periódy aj po ňom. Porovnaním priemernej hodnoty driftu snímača pred a po teste indikuje ľubovoľnú prechodnú alebo trvalú zmenu charakteristiky snímača.

Pokiaľ sa aplikuje akcelerácia kolmo na citlivé osi, potom môžeme zisťovať presluchy alebo ortogonalitu osí. V týchto prípadoch akcelerometer pracuje pod napätím a zrýchlenie aplikované na akcelerometer sa zvyšuje po malých krokoch až po maximálnu hodnotu a následne naspäť po nulu krok po kroku. V každom kroku sa hodnota ukladá pre danú periódu, a potom sa porovná s predpokladanou hodnotou s multi-position testu. Meranie sa opakuje dovtedy kým sa nedosiahnu dôveryhodné výsledky a kým sa akcelerometer nepootočí o 180°, aby sa zaznamenala opačná akcelerácia vzhľadom ku citlivým osiam. Takisto ako pri gyroskope sa testuje aj maximálna hodnota, ktorá je zvyčajne 10 až 20% nad doporučenou hodnotou. Po tomto teste sa ešte opakuje multi-position test, aby sa zistilo, či nedošlo k poškodeniu snímača.

2.6.10 Vibračný test

Tento test sa vykonáva ako posledný zo série testov vykonaných na inerciálnych snímačoch v dôvodu potenciálne vysokého rizika trvalého poškodenia snímača. Treba dbať na opatrenia zabezpečujúce aby rezonančné frekvencie upínacieho zariadenia nezosilnili aplikované zrýchlenie. Odporúča sa dôkladné vyšetrenie správania štruktúry, použitej na upevnenie snímača na vibračný stolík, ešte pred spustením samotného testu.

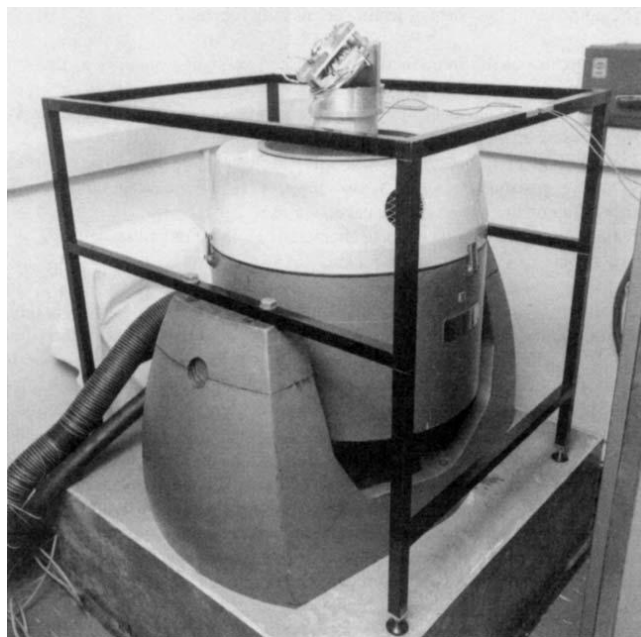
Účelom tejto formy testovania je obvykle 5 cieľov:

- Zistenie frekvencie, pri ktorej sa vyskytujú rezonančné odozvy snímača.
- Zhodnotenie anisoelectricity alebo závislosť akcelerácie štvorca skreslenia.
- Skúška odolnosti a schopnosti prežitia snímača v určitom vibračnom prostredí. Snímač môže byť buď v kludovom režime alebo prevádzkovom režime, v závislosti od konkrétneho testu.
- Odhad zmeny v šumovej charakteristike výstupného signálu snímača vo vibračnom prostredí.
- Odhad frekvenčnej odozvy snímača.

Vibrácie sú obvykle vytvárané vibračným stolíkom. Obvykle býva vybavený plochou, na ktorú sa pripevňuje snímač. Stôl je poháňaný pozdĺž určených os pomocou elektromagnetu napájaného tak, aby mal požadovanú frekvenciu a tvar vlny. Stôl môže kmitať vo zvislom smere alebo sa môže pootočiť o 90°. Príklad vibračného stola je zobrazený na obrázku č.2.18.

Môžu byť aplikované dve formy pohybu na testovaciu plochu a to buď sínusový alebo s náhodnou frekvenciou vibrácie. V prípade sínusu, sa zmena polohy stola mení v závislosti od zvoleného frekvenčného pásma, bez prekročenia nadefinovanej hranice zrýchlenia. V druhom prípade sa používajú náhodné vibrácie podľa danej výkonovej spektrálnej hustoty frekvenčného pásma.

Počas testovania s vibračným stolom, môže byť nutnosť použiť de-gausove cievky z dôvodu, že niektoré vibračné zariadenia produkujú veľké magnetické pole. Tieto polia môžu zmeniť drift snímača, ako bolo spomenuté v sekcii testovanie magnetickej citlivosti. Preto treba dbať, aby sa vyhodnocovali skutočné účinky a nie artefakty spôsobené testovacím zariadením.



Obrázok č. 2.18 Fotografia vibračného stola používaného pre testovanie snímačov [1]

Je zvykom vykonávať prvú sériu testov na nízkej úrovni zrýchlenia so snímačom pôsobiacim tak, aby sa zistilo, či rezonancie vzniknú na danej frekvencii. Táto skutočnosť umožňuje určovať parametre snímača mimo frekvencií, na ktorých je rezonančná frekvencia. Počas tohto testu sa používa malý spätnoväzobný akcelerometer, ktorý je pripevnený na testovaný snímač alebo na upevnenie, ktorým je snímač pripevnený o stôl a sníma akceleráciu, ktorá pôsobí na snímač. Používa sa spätnoväzobný vibrátor, aby sme zabezpečili, že pôsobíme požadovaným zrýchlením na snímač.

3 MERANIE STABILITY OFSETU

3.1 Úvod

Cieľom tohto merania je zistiť stabilitu výstupu snímača pri konštantných podmienkach. Jedná sa o takzvaný switch-on to switch-on test. Ako už bolo zmienené jednými z najdôležitejších parametrov pri návrhu kvalitnej inerciálnej navigácie je práve určenie statického modelu, ktorý pozostáva hlavne zo statických chýb, ktoré sa s časom akumulujú a pri následnej integrácii spôsobujú nepresnosť navigácie. Správne určenie modelu daného snímača túto nepresnosť znižuje, lepšie povedané snaží sa ju eliminovať.

3.2 Meranie s NI-USB 6215 bez regulovanej teplotnej komory

V prvej fáze merania som chcel zistiť, všetky parazitné vplyvy na meranie a sledovať charakter výstupného napätia v čase, správanie po opätovnom zapnutí t.j. ustálenie na rovnakej hodnote.

Meranie prebiehalo v pravidelných intervaloch. Čas medzi meraniami, teda čas ktorý slúžil na to, aby sa snímač dostal do pôvodných podmienok, ako pred meraním, bol 15 minút. Meranie nebolo automatizované, t.j. zapínanie a vypínanie zdroja prebiehalo manuálne.

Merací reťazec vo všeobecnosti pozostával z DUT(meraný snímač), meracej karty, zdroja napätia, PC na vyhodnocovanie meraní, teplotnej komory, voltmetra.

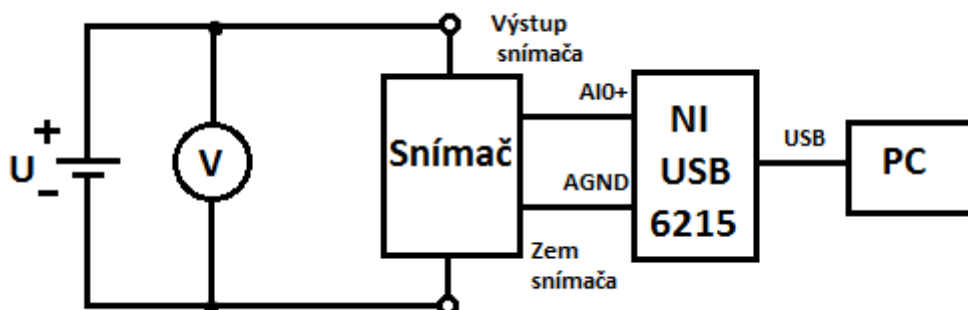
Snímač bol napájaný napätím, ktoré doporučuje výrobca. Jeho hodnota je uvedená v katalógových listoch snímačov. Ako napájací zdroj bol použitý stabilizovaný zdroj TESLA BK127. Referenčný zdroj hodnoty napájacieho napätia bol multimeter VOLTcraft VC940. Snímač bol umiestnený v bežnom nepájivom poli. Na zber dát som použil 16 bitovú kartu NI USB-6215 od firmy National Instruments. Výsledky som vyhodnocoval v Signal Expresse a následne spracoval Matlabe.

Meranie bolo vykonané na dvoch low cost akcelerometroch, ADXL335 od firmy analog devices a MMA7260QT od firmy Freescale.

Na zníženie vplyvu teploty som použil tepelne odizolovanú komoru, v ktorej bol umiestnený daný inerciálny snímač. Teplota v komore sa žiadnym spôsobom neregulovala. Týmto spôsobom sa výrazne znížil vplyv okolitej teploty na meranie, ktorý by mal význam pri krátkodobejšom meraní bez požadovanej hodnoty teploty. Umiestnenie snímača do komory malo za následok len predĺženie časových konštánt, ktoré sa pri zmene vonkajšej teploty pri dlhodobejšom meraní prejavili vo výsledných meraniach.

Pred zahájením merania som si vždy skontroloval spektrum daného snímača a zistil vplyv vyšších frekvencií pri pomalom vzorkovaní. Ani pri jednom z oboch snímačov sa neprejavila žiadna významná frekvencia v spektre, preto som si dovoľil vzorkovať

na frekvencii 25Hz bez použitia AA filtra alebo prípadného SW podvzorkovania. Pre prvotné pozorovanie, či na výstupe dochádza k pomalým zmenám som to považoval za dostačujúce. Schéma zapojenia bola pri oboch snímačoch zhodná.



Obrázok č. 3.1 Všeobecná schéma zapojenia

Použité meracie prístroje

stabilizovaný zdroj BK 127

DAQ NI USB-6215

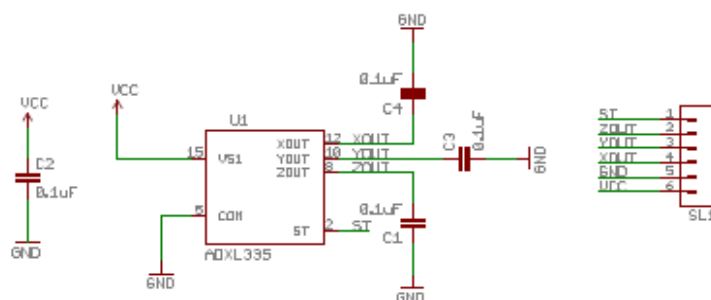
Multimeter VOLTcraft VC 940

PC

Nepájivé pole, vodiče

teplomer

3.2.1 ADXL335



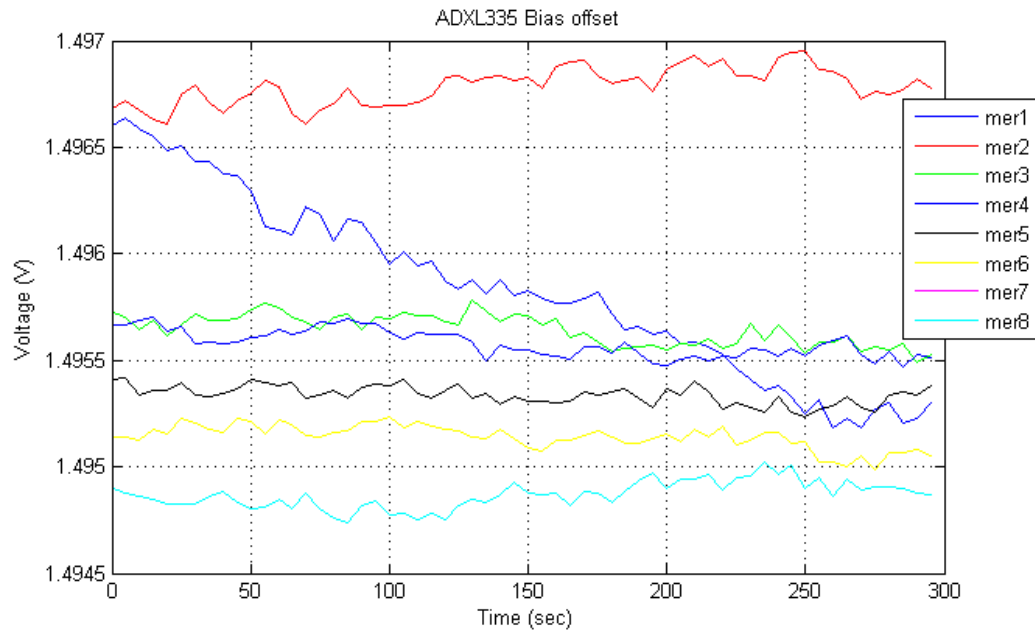
Obrázok č. 3.2 Schéma zapojenia vývojovej dosky akcelerometra ADXL335

Podmienky merania

$U_{NAP} = 2,9962 \text{ V}$

vzorkovacia frekvencia = 25 Hz

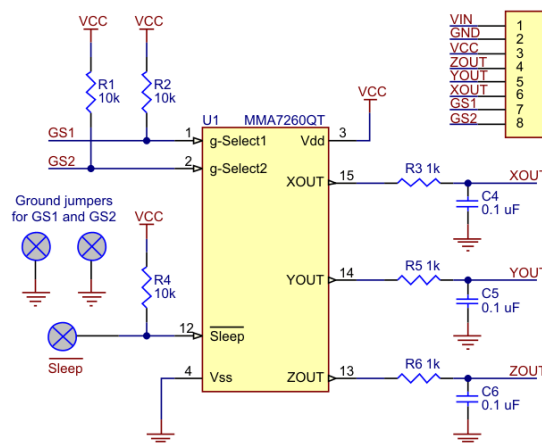
čas zberu dát = 300 s
 teplota okolia = 21 až 24 °C
 teplota v komore = 21.3 až 22.5 °C
 meraná os X
 prestávka medzi meraniami 15 minút



Obrázok č. 3.3 Priebeh výstupu akcelerometra ADXL 335 v čase

Pri tomto meraní sa pohybovala teplota v miestnosti v rozmedzí 3°C. Premeraná bola jedna os snímača X. Táto os mala hodnotu statického zrýchlenia 0g. Hodnota výstupného napätia mala náhodný charakter, ako vidno na obrázku č.3.6. Zmena napätia na výstupe bola 50mV. Väčšina hodnôt sa po 250 ustálila v okolí 1,4955V. Jedna hodnota s časom narastala a ustálila sa zhruba na 1,497V.

3.2.2 MMA7260QT



Obrázok č. 3.4 Schéma zapojenia vývojovej dosky akcelerometra MMA7260QT

Podmienky merania

$U_{NAP} = 2,9917 \text{ V}$

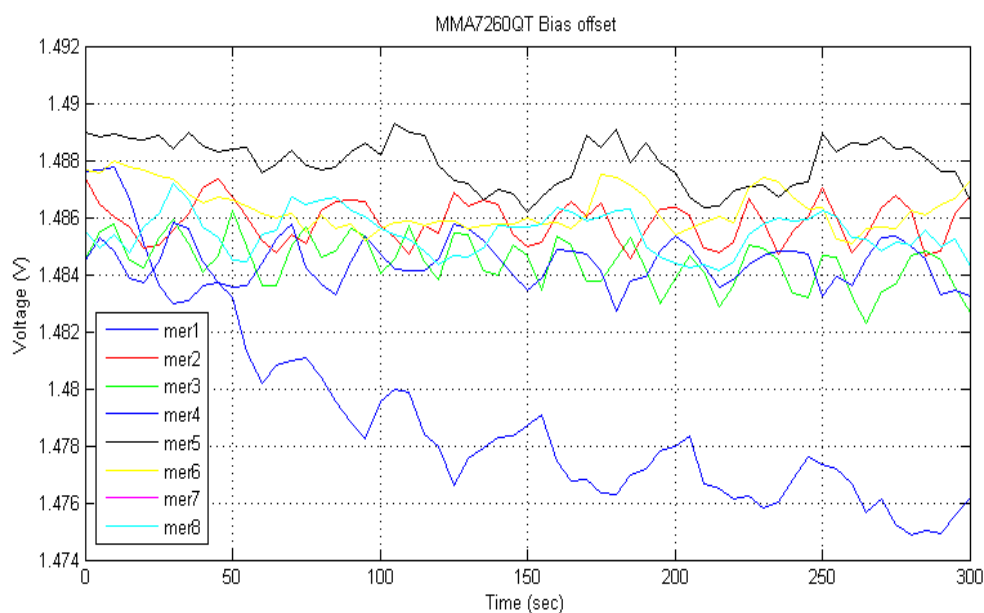
vzorkovacia frekvencia = 25 Hz

čas zberu dát = 300 s

teplota okolia = 21.3 až 23 °C

meraná os X

prestávka medzi meraniami 15 minút



Obrázok č. 3.5 Priebeh výstupu akcelerometra MMA7260QT v čase

Tak ako v predošlom prípade som premeral jeden výstup akcelerometra MMA7260QT, a to výstup X. Teplota v miestnosti sa pohybovala v rozmedzí 1,7°C. Rozptyl hodnôt v čase 300 sekúnd bol 14mV. Meranie číslo štyri vykazuje exponenciálny pokles napätia, ostatné hodnoty sa pohybovali v rozmedzí od 1,482 do 1,49V.

3.2.3 Zhodnotenie

Na oboch snímačoch vidno závislosť na teplote. Výrobca v prvom prípade ADXL 335 udáva zmenu offsetu 1mg/°C. Zmena 3°C odpovedá napätiu 0,9mV, pričom nameraná zmena odpovedá 50mV.

Pri MMA7260QT výrobca udáva zmenu offsetu $0,6\text{mg}/^{\circ}\text{C}$. To odpovedá zmene $0,816\text{mV}$ a nameraná zmena bola 14mV . To znamená, že na meranie majú vplyv aj iné faktory, prípadne výrobca udáva nesprávnu hodnotu závislosti offsetu na teplote.

K zisteniu treba teplotnú komoru s reguláciou teploty, automatizovať meranie, zvýšiť počet meraní, stabilný zdroj napájania a zvýšiť vzorkovaciu frekvenciu, aby sa neprejavovali artefakty vyšších harmonických v meraní a dodržal vzorkovací teorém

3.3 Meranie s NI-USB 6215 s prepojenými kanálmi

V prvej fáze meraní som overil, že na výstupe snímačov dochádza k zmenám výstupnej hodnoty. Ďalším krokom bolo zistenie, či zmena výstupu bola spôsobená náhodným charakterom výstupného signálu alebo vplyvom okolitých zmien teploty, napájacieho napätia a pod.

Cieľom bolo eliminovať všetky možné vplyvy, ktoré pôsobia na snímač, a to hlavne vplyv teploty a kolísanie napájacieho napätia.

Keďže sa jedná o časovo náročné meranie bolo potrebné meranie plne automatizovať a zvýšiť počet meraní. Automatizovaním merania sa minimalizoval zásah samotného človeka do meracieho procesu.

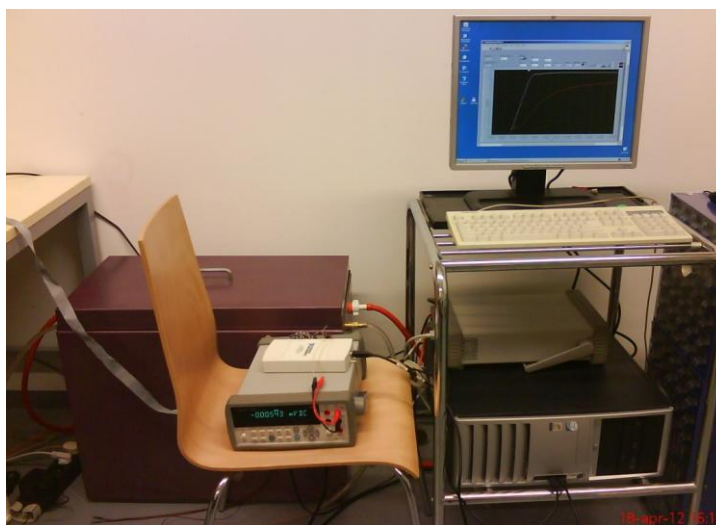
Na udržiavanie konštantnej teploty som do meracieho reťazca zaradil teplotnú komoru, ktorá disponuje možnosťou nastaviť požadovanú teplotu a udržiavať jej konštantnú hodnotu počas merania.

Pre meranie snímačov som zvolil spôsob napájania pomocou karty NI-USB 6215, ktorá disponuje dvoma analógovými výstupmi a šiestimi single-ended vstupmi. Obidva analógové výstupy zvládajú prúdový odber 2mA , čo je dostačujúce pre väčšinu Low-cost akcelerometrov. Keďže karta disponuje len jedným prevodníkom a vzorkovaciu frekvenciu som nastavoval na hodnotu 1kHz alebo 3.2kHz , mohlo dochádzať k presluchom medzi jednotlivými kanálmi DAQ karty. Túto chybu som sa snažil minimalizovať dvoma spôsobmi. Pripojením dvoch vstupov k rovnakému výstupu zo snímača. Pre vyhodnocovanie som vždy použil len druhý kanál. V druhom prípade pripojením každého druhého kanála na analógovú zem karty. Karta tým mala získať dostatočný čas na to, aby na jej výstupe bola relevantná hodnota.

Každý snímač, okrem akcelerometra ADXL193, ktorý mal vnútorný besselov filter, obsahoval RC filter prvého rádu, pomocou ktorého som nastavoval šírku pásma konkrétneho akcelerometra.

Na obrázku č.3.7 je zobrazené pracovisko pre meranie offsetu. Počet pripojených kanálov na karte sa líšil podľa toho o koľko ose akcelerometre sa jednalo.

Teplota v komore sa vyhodnocovala pomocou samostatného snímača, ktorý bol pripojený k PC a jeho hodnoty sa spracovávali v samostatnom Vi určeného pre riadenie teploty v komore.



Obrázok č. 3.6 Pracovisko merania stability offsetu

3.3.1 Spracovanie meraní

Cieľom tohto merania bolo zistiť, ako sa správa výstup inerciálnych snímačov, a čo ho ovplyvňuje. Každé meranie malo 72 iterácií. Dáta som ukladal po každých 300 sekundách do jedného súboru, t.j. pri 72 iteráciách som mal 72 súborov. Používal som súbory typu lvm. Pri meraní dvoch trojosých akcelerometroch som mal v jednom súbore 12 kanálov po 300 000 riadkov. Súbor obsahoval aj dáta zo spoločných kanálov, prípadne kanálov pripojených ku AGND karty NI-USB 6215.

Po ukončení meraní som súbory preukladal podľa jednotlivých výstupov do spoločných súborov. Potom som dáta orezal o prvých 100 hodnôt, čo predstavuje 100ms, kvôli startupu snímačov a následne decimoval pomocou digitálneho dolnofrekvenčného filtra s $f_{-3dB}=100\text{Hz}$ a konvertoval dáta do súboru typu TDMS.

Ako prvé som vyhodnocoval výsledky opakovateľnosti switch-on to switch-on, kde som skúmal ustálenie offsetu po 300 sekundách pri 72 zapnutiach. Z posledných tisíc hodnôt, každej iterácie som spočítal medián a následne určil rozptyl hodnôt, na ktorých sa výstup ustálil. Pre lepšie porovnanie s ostatnými snímačmi som hodnotu prepočítal na zrýchlenie.

Po spriemerovaní všetkých hodnôt mediánu som dostal jednu konkrétnu hodnotu, ktorú som následne porovnával s údajom výrobcu, pokiaľ ju udával v katalógovom liste snímača.

Ďalej som sa snažil prísť na to, ako vykresliť závislosť výstupu na vnútornej teplote snímača. Tak ako v predošlom prípade som použil medián z posledných 1000 hodnôt každého merania, kedy som predpokladal, že teplota snímača bude už ustálená. Od každého merania som odstránil DC zložku a následne som signály spriemeroval. Pomocou tohto procesu som získal výstupnú závislosť snímača. Odčítaním DC zložky

som sa zbavil chyby, ktorá vzniká pri opätovnom zapínaní snímača. Tým pádom som získal merania, ktorých priebeh zobrazoval závislosť snímača od vnútornej teploty.

Použité meracie prístroje

NI-USB 6215

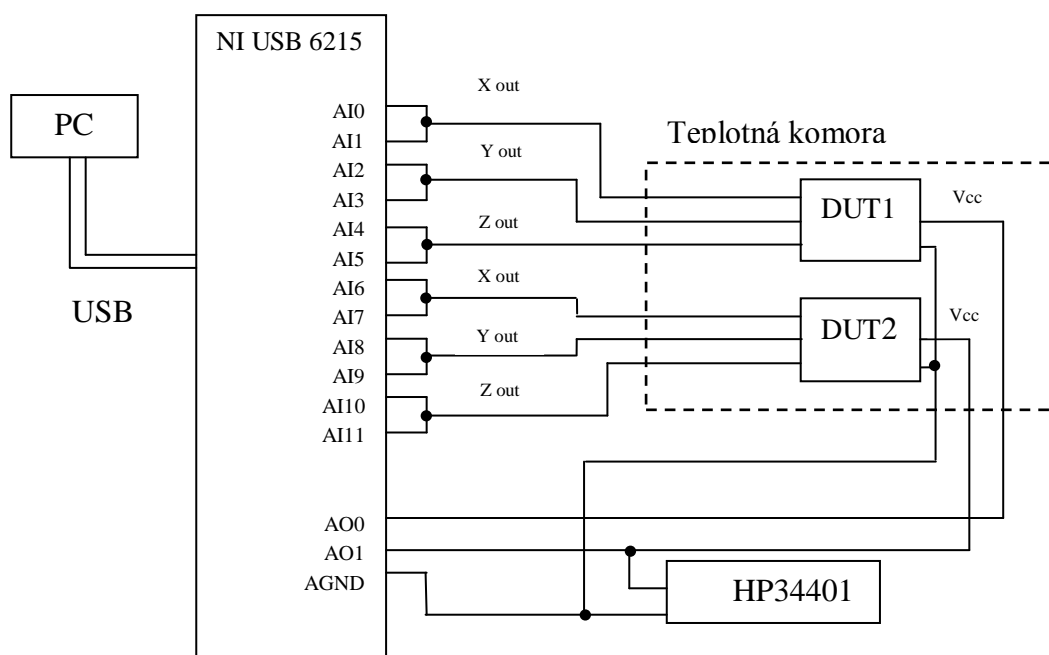
HP34401A

Teplotná komora

PC

Softvér na spracovanie LabView 11

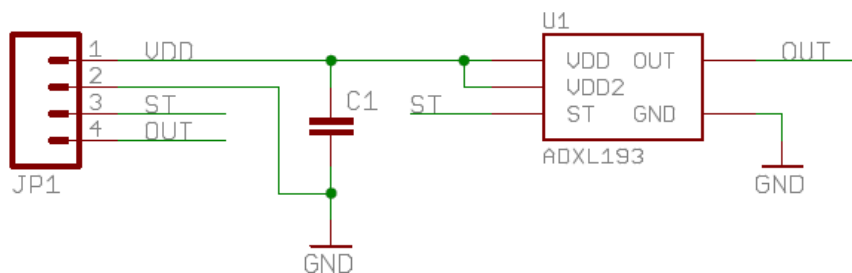
Nepájivé pole, vodiče



Obrázok č. 3.7 Schéma zapojenia merania ofsetu s prepojenými kanálmi

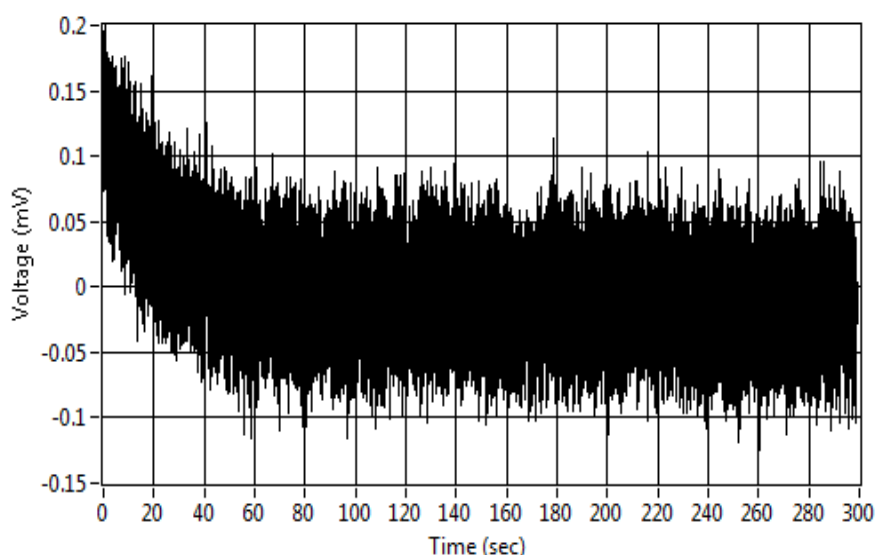
3.3.2 ADXL 193

ADXL 193 je jednoosý akcelerometer od firmy analog devices. Merací rozsah akcelerometra je $\pm 125g$. Používa sa pre detekciu otrasov, zisťovanie kolízií automobilov prípadne v riadení a monitorovaní vibrácií. Dokáže merať ako statické (gravitáciu), tak aj dynamické zrýchlenie. Akcelerometer využíva Besselov filter, ktorým je nastavená šírka pásma akcelerometra na 400Hz. Výrobcom doporučené napájacie napätie je 5V. Prúdový odber akcelerometra je 1,5mA. Rezonančná frekvencia akcelerometra je 24 kHz. Na obrázku č.3.8. je zobrazená schéma zapojenia snímača ADXL 193. [19]



Obrázok č. 3.8 Schéma zapojenia ADXL193

Teplota v komore bola nastavená na hodnotu 25°C. Jej hodnota sa pohybovala v rozsahu $25 \pm 0,18^\circ\text{C}$.

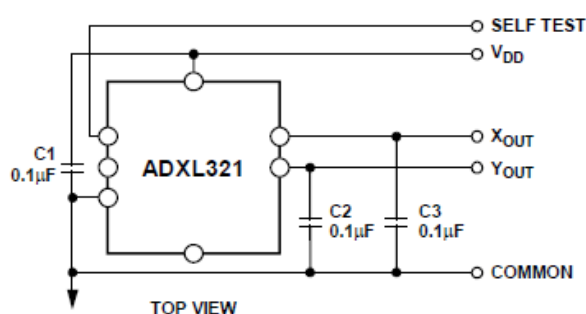


Obrázok č. 3.9 ADXL193 priemerovaný výstup Xout

Na obrázku č.3.9 je zobrazený priebeh výstupu X_{out} akcelerometra ADXL193. Rozptyl hodnôt bol po 300 sekundách 0,473mg. Priemerná hodnota výstupu bola 2,483V. Rozdiel medzi výrobcom udávanou hodnotou je 17mV. Zmena medzi počiatčnou a koncovou hodnotou výstupu je 147μV, pri citlivosti 8mV/g, to predstavuje 16mg. Vnútna teplota akcelerometra sa ustálila pomerne rýchlo, zhruba po 60 sekundách.

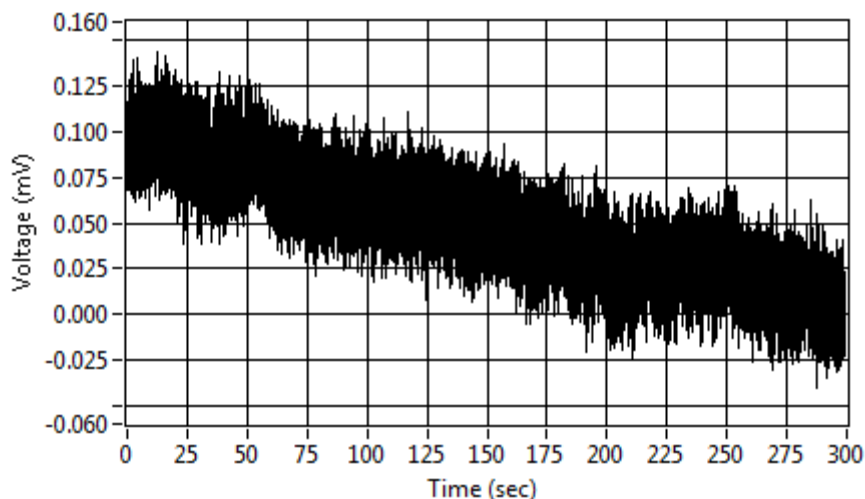
3.3.3 ADXL 321

ADXL 321 je dvojosí low-cost akcelerometer pracujúci na kapacitnom princípe. Merací rozsah akcelerometra je typicky $\pm 18g$. Keďže pracuje na kapacitnom princípe je schopný merať ako statické (gravitácia), tak aj dynamické zrýchlenie. Na obrázku č.3.10 je zobrazená schéma zapojenia ADXL 321. Na výstupoch je RC filter prvého rádu, ktorý pozostáva z interného rezistora akcelerometra s hodnotou $32k\Omega$ a kondenzátora s kapacitou $100nF$. RC filtrom bola nastavená šírka pásma akcelerometra na 50Hz. Citlivosť snímača je $57mV/g$. [20]



Obrázok č. 3.10 Schéma zapojenia ADXL321 [23]

Napájacie napätie bolo nastavené na 3V. Hodnota na referenčnom voltmetri HP 34401A bola $2,99916 \pm 0,000015V$. Teplota v komore bola $25 \pm 0,18^{\circ}C$, tak ako pri ADXL 193.



Obrázok č. 3.11 ADXL321 priemerovaný výstup Yout

Výstupný priebeh je zobrazený na obrázku č.3.11. Priebeh má lineárny charakter s klesajúcou tendenciou. Vnútna teplota sa ani po 300 sekundách merania neustálila.

Rozdiel medzi počiatočnou a koncovou teplotou po odstránení DC zložky bol $64,8 \mu\text{V}$, čo odpovedá $1,1 \text{ mg}$. Rozptyl výstupu po 72 iteráciách bol $8,4 \text{ mg}$.

3.3.4 ADXL 335

Jedná sa o trojosí low-cost akcelerometer. ADXL 335 má merací rozsah $\pm 3,6g$. Pracuje na kapacitnom princípe, t.j. dokáže merať ako statické, tak aj dynamické zrýchlenie. Šírka pásma akcelerometra bola nastavená pomocou RC filtra prvého rádu, ktorý sa skladal z kondenzátorov 100 nF , a rezistorov $32 \text{ k}\Omega$, na 50 Hz . Prúdový odber akcelerometra bol $350 \mu\text{A}$. Citlivosť snímača je 300 mV/g [18]

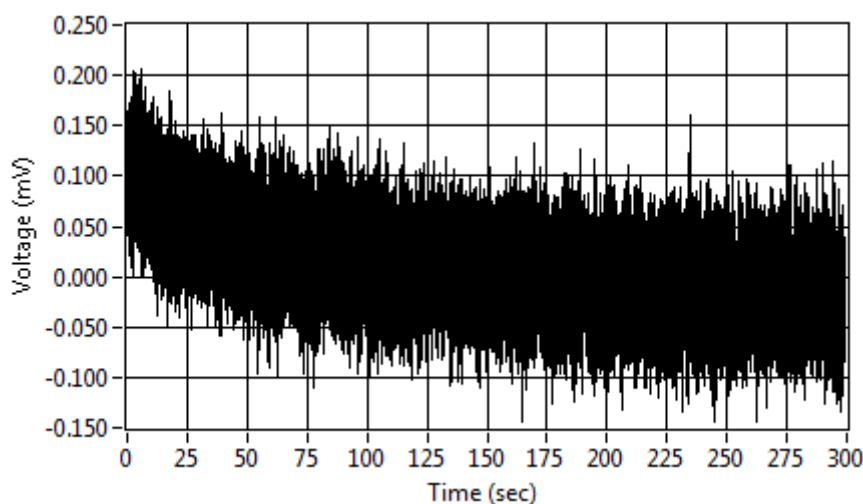
Akcelerometer ADXL 335 bol napájaný pomocou karty NI-USB 6215 z analógového výstupu AO0. Pre meranie výstupov z akcelerometra boli použité vstupy AI0 až AI5. Hodnota napájacieho napätia bola nastavená na 3 V . Hodnota na referenčnom voltmetri sa pohybovala počas merania na úrovni $2,999135 \pm 0,00001 \text{ V}$.

Teplota v komore bola nastavená na 25°C . Jej hodnota počas merania dosahovala hodnoty $25 \pm 0,02^\circ\text{C}$. Hodnotu teploty s daným rozptylom som pokladal za konštantnú, zmena nemala vplyv na výsledné meranie.

Hodnoty boli zvolené podľa referenčných hodnôt, ktoré uvádza výrobca v katalógovom liste ADXL 335.

Rezonančná frekvencia akcelerometra sa nachádza na hodnote 5.5 kHz . Vzorkovaciu frekvenciu som zvolil 1 kHz .

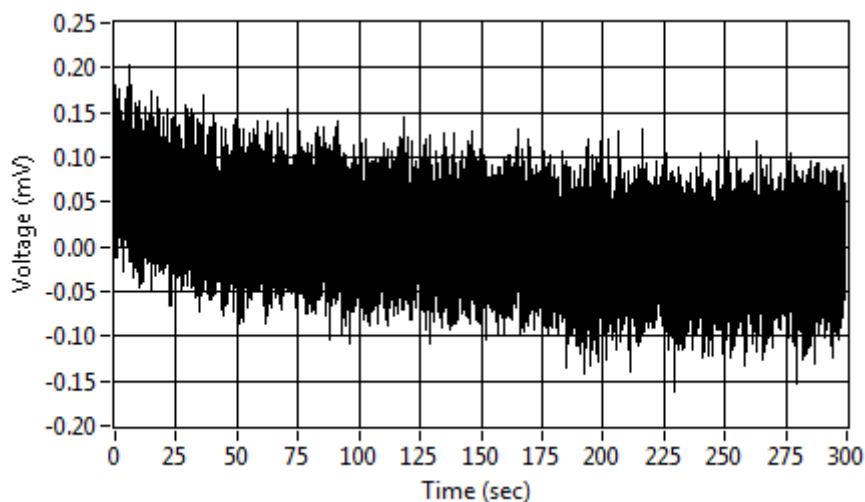
Na obrázkoch č.3.12 až 3.14 sú zobrazené priebehy výstupov os akcelerometra X, Y, Z. Hodnota statického zrýchlenia výstupov X a Y bola 0 g a Z bola 1 g .



Obrázok č. 3.12 ADXL335 priemerovaný výstup Xout

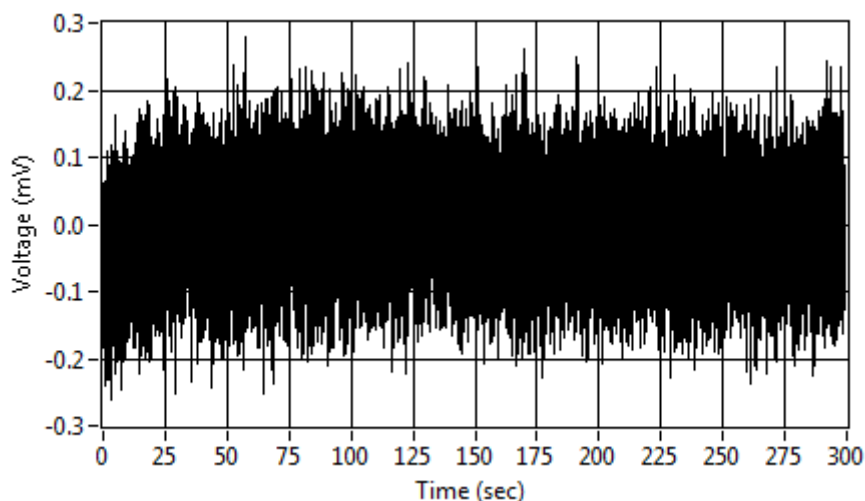
Bez odstránenia DC zložky sa akcelerometer po 300 sekundách ustálil na hodnote $1,499 \text{ V}$ a rozptyl výstupu mal hodnotu $2,85 \text{ mg}$. Závislosť výstupu X_{out} na vnútornej teplote má exponenciálnu závislosť. Vnútna teplota akcelerometra sa ustálila približne

v čase 225 sekúnd. Akcelerometer mal rozdiel medzi počiatočnou hodnotou výstupu, po odčítaní DC zložky, a koncovou hodnotou $115\mu\text{V}$, čo pri citlivosti 300mV/g činí zmenu $0,384\text{mg}$.



Obrázok č. 3.13 ADXL335 priemerovaný výstup Y_{out}

Rozptyl hodnôt výstupu Y_{out} bol $1,21\text{mg}$. Výstup sa po 300s ustálil na hodnote $1,546\text{V}$. Zmena medzi počiatočnou a koncovou hodnotou výstupu bola $63,27\mu\text{V}$. Táto zmena odpovedala zmene $0,292\text{mg}$. Tak ako pri X_{out} aj Y_{out} má exponenciálnu závislosť na vnútornej teplote akcelerometra. Hodnota vnútornej teploty sa ustálila približne po 200 sekundách.



Obrázok č. 3.14 ADXL335 priemerovaný výstup Z_{out}

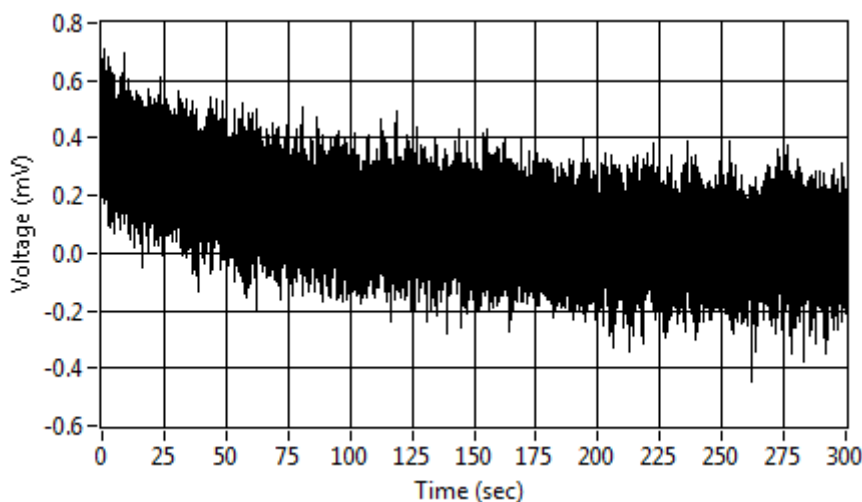
Keďže výstup Z_{out} mal hodnotu statického zrýchlenia $1g$ jeho hodnota sa neustálila na polovici napájania, ale na hodnote $1,81\text{V}$. Rozptyl hodnôt výstupu po ustálení bol $1,41\text{mg}$. Zmena medzi počiatočnou a koncovou hodnotou bola $66,8\mu\text{V}$. Zmena

odpovedá zmene 0,223 mg. Priebeh zobrazený na obrázku č.3.14 má logaritmický charakter s narastajúcou tendenciou. Hodnota vnútornej teploty sa ustáli na čase približne 100 sekúnd.

3.3.5 MMA 7260QT

MMA 7260QT je trojosí low-cost akcelerometer pracujúci na kapacitnom princípe. Výrobca udáva teplotnú kompenzáciu na každom výstupe. Napájacie napätie som zvolil 3,3V, prúdový odber sa pohyboval okolo 500 μ A. Akcelerometer má možnosť nastaviť rozsah na 1,5/2/4/6. V mojom prípade som rozsah nastavil na 1,5g. Pri tomto rozsahu má akcelerometer citlivosť 800mV/g. Zapojenie akcelerometra je zvolené podľa doporučení výrobcu a je zobrazené na obrázku č.3.4. Na výstupoch akcelerometra je pripojený RC, ktorý sa skladá z rezistora o veľkosti 1k Ω a kondenzátora s kapacitou 100nF, ktorým je nastavená šírka pásma akcelerometra pre výstupy X a Y na 350 Hz a pre Z na 150Hz. Schéma zapojenia akcelerometra je zobrazená na obrázku č.3.4. [22]

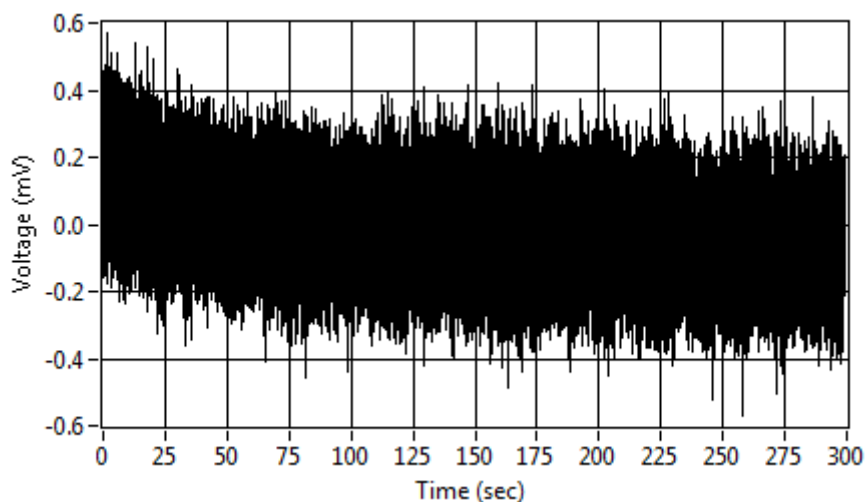
Hodnota napájacieho napätia pri meraní bola $3.298919 \pm 0,00001$ V. Teplota v komore sa pohybovala na $25 \pm 0,015^{\circ}\text{C}$. Hodnoty teploty a napájacieho napätia boli nastavené podľa katalógového listu výrobcu. Na obrázkoch č.3.15 až 3.17 sú zobrazené výstupné priebehy X, Y a Z. Výstupy X a Y mali statické zrýchlenie 0 g, za týchto okolností, pri napájaní 3,3 V a teplote 25°C má byť výstupná hodnota 1,65V. Výstup Z mal statické zrýchlenie -1 g a hodnota výstupu za daných podmienok má byť 0,85V. [22]



Obrázok č. 3.15 MMA7260QT priemerovaný výstup X_{out}

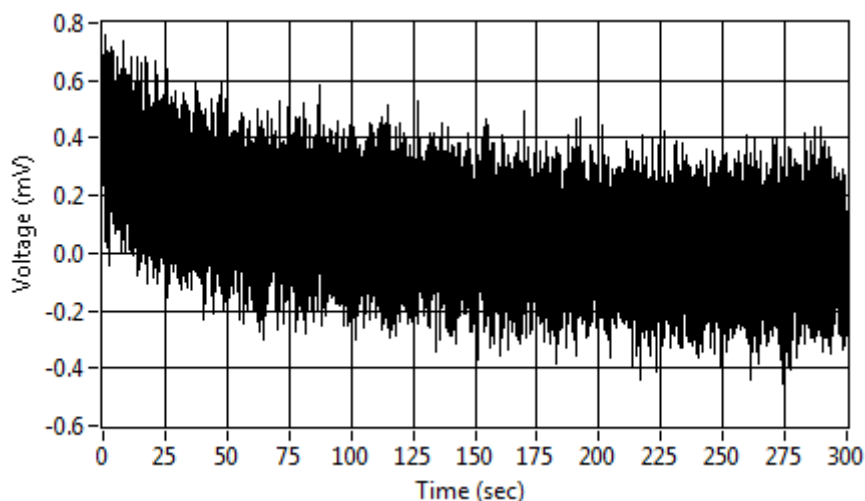
Hodnota výstupu X_{out} sa po 300 sekundách ustálila po spriemerovaní na hodnote 1,659V. Rozptyl výstupu bol 0,84mg. Odchýlka oproti hodnote, ktorú udáva výrobca je 9mV. Po odstránení DC zložky bola zmena medzi počiatočnou a koncovou hodnotou

výstupu $464,3\mu\text{V}$, táto hodnota predstavuje zmenu $0,59\text{ mg}$. Priebeh výstupu akcelerometra má exponenciálny charakter, ktorý je spôsobený vnútornou teplotou akcelerometra. Hodnota vnútornej teploty sa ustálila približne po 250 sekundách.



Obrázok č. 3.16 MMA7260QT priemerovaný výstup Yout

Ako vidno na obrázku č.3.14, výstup Y_{out} má priebeh výstupnej charakteristiky s exponenciálnou závislosťou. Rozptyl po ustálení a prepočte na zrýchlenie bol $1,7\text{mg}$. Hodnota výstupu bola po výpočte mediánu $1,661\text{V}$. Oproti hodnote, ktorú udáva výrobca je rozdiel 11mV . Zmena medzi počiatočnou hodnotou výstupu a koncovou hodnotou činila v tomto prípade $254,6\mu\text{V}$, čo odpovedá zmene $0,34\text{mg}$. Hodnota vnútornej teploty sa ustálila v čase okolo 250 sekúnd.



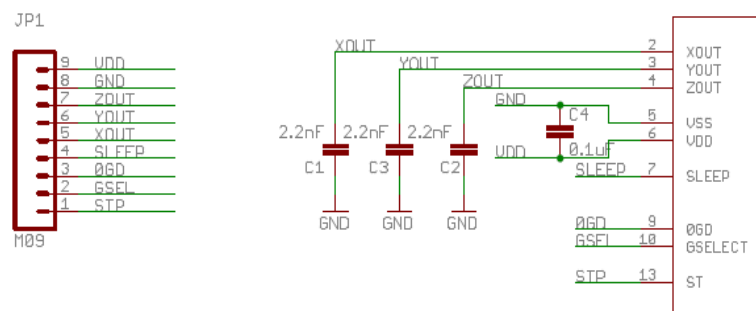
Obrázok č. 3.17 MMA7260QT priemerovaný výstup Zout

Hodnota výstupu Z_{out} po ustálení dosahovala hodnoty $1,442\text{V}$. Rozdiel medzi výrobcom udávanou hodnotou, ktorá je $0,85\text{V}$ je $0,592\text{V}$. Rozptyl výstupu po ustálení bol $0,88\text{mg}$. Zmena medzi počiatočnou a koncovou hodnotou bola $491\mu\text{V}$, čo pri

citlivosti 800 mV/g predstavuje zmenu 0,576mg. Hodnota vnútornej teploty sa ustálila v čase okolo 240 sekúnd.

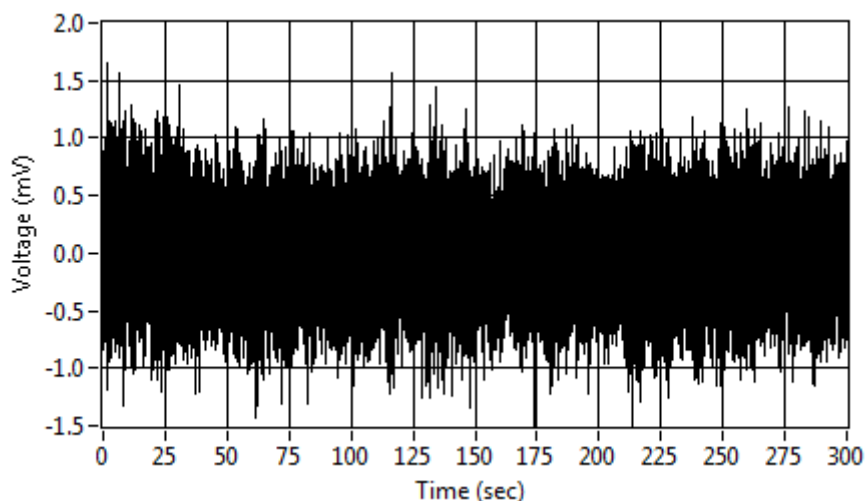
3.3.6 MMA 7361L

Podobne ako pri MMA7260QT aj MMA7361L je trojosí akcelerometer od firmy Freescale Semiconductor. Má vnútornú teplotnú kompenzáciu na výstupe a nastaviteľný merací rozsah $\pm 1,5g$ alebo $\pm 6g$. Pri nepripojenom pine g-Select je defaultne nastavený rozsah $\pm 1,5g$. Pri napájaní 3,3V je prúdový odber akcelerometra $400\mu A$. Výstupná hodnota pri nulovom statickom zrýchlení je 1,65V. Citlivosť akcelerometra je 800mV/g. Šírka pásma akcelerometra bola nastavená pomocou RC filtra na hodnotu 1500 Hz. Výrobca udáva zmenu offsetu $\pm 0,5mg/^{\circ}C$. Schéma zapojenia MMA7361L je zobrazená na obrázku č.3.18. [21]



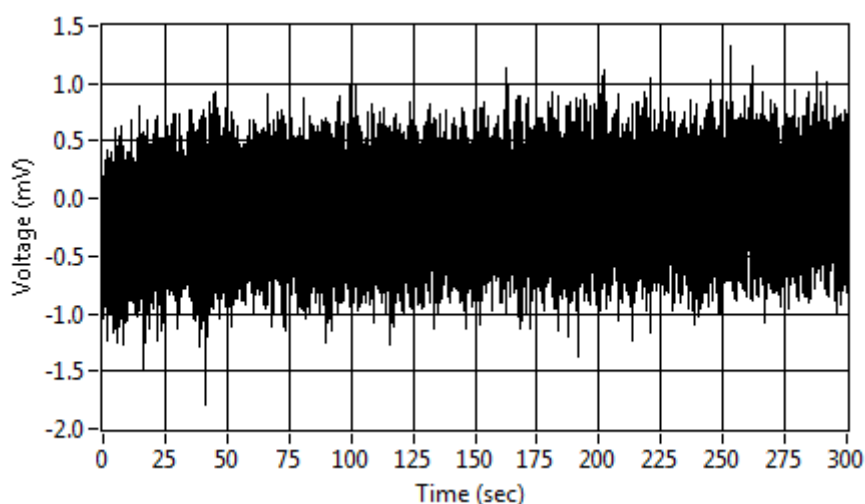
Obrázok č. 3.18 Schéma zapojenia MMA7361L [24]

Teplota v komore bola nastavená na 25°C. Jej reálna hodnota bola $25 \pm 0,015^{\circ}C$. Vzorkovacia frekvencia bola 3200Hz. Súčasne s meraním MMA7361L prebiehalo na karte NI USB-6125 aj meranie MMA7260QT. Priebehy výstupov X, Y, Z sú zobrazené na obrázkoch č.3.19 až 3.21.



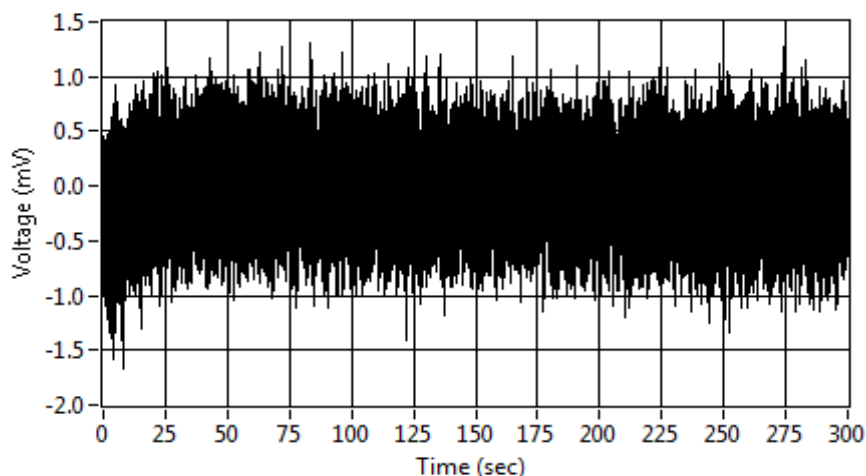
Obrázok č. 3.19 MMA7361L priemerovaný výstup Xout

Hodnota X_{out} sa po 300 s ustálila na hodnote 1,557V. Rozdiel medzi hodnotou výrobcu je 93mV. Hodnota rozptylu pri konci merania bola 6,62mg. Zmena medzi počiatočnou a koncovou hodnotou výstupu po odstránení DC zložky bola 101 μ V, čo predstavuje 0,126mg. Na výstupnom priebehu nevidno žiadnu závislosť na teplote, výstup sa v čase nemenil.



Obrázok č. 3.20 MMA7361L priemerovaný výstup Yout

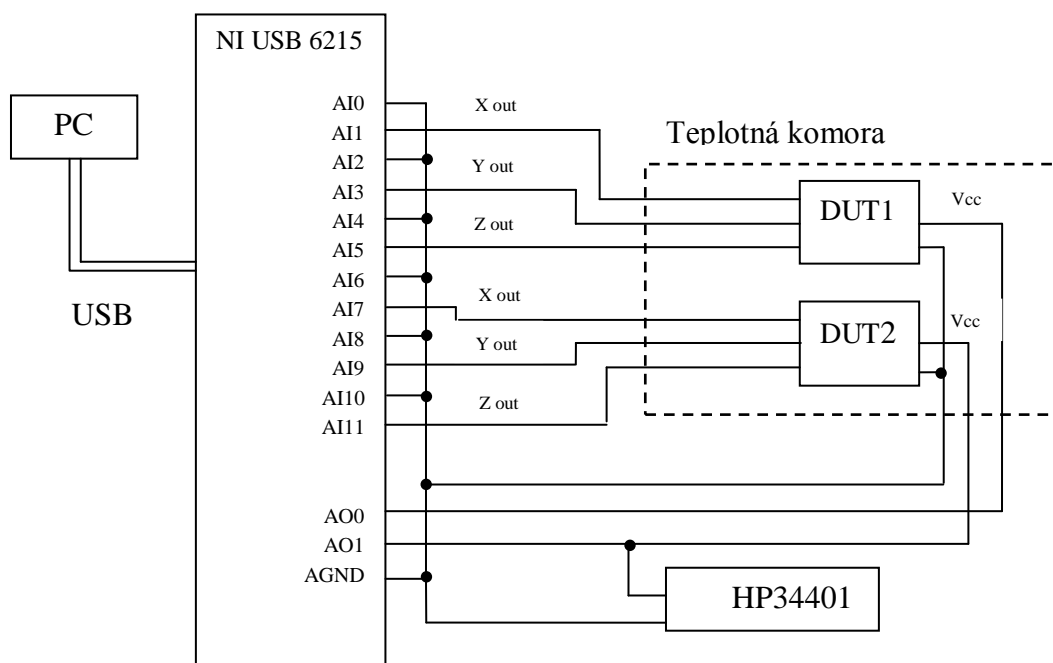
Hodnota výstupu Y_{out} V čase 300s po prepočte bola 1,730V. Rozptyl výstupu mal po prepočte hodnotu 2,59mg. Rozdiel medzi nameranou hodnotou a udávanou výrobcom bol 80mV. Priebeh vnútornej teploty výstupu Y_{out} má mierne narastajúcu tendenciu. Výstup sa ani po 300 s neustálil na konkrétnej hodnote. Rozdiel medzi počiatočnou a koncovou hodnotou bol 476 μ V. Hodnota odpovedá zmene 0,595mg.



Obrázok č. 3.21 MMA7361L priemerovaný výstup Z_{out}

Hodnota výstupu Z_{out} má zodpovedať hodnote 2,45V, keďže statické zrýchlenie má hodnotu 1 g. Nameraná hodnota po prepočte bola 2,166V. Rozdiel je 284mV. Rozptyl hodnôt bol 3,23mg. Hodnota výstupu sa ustálila po 50s. Zmena medzi počiatkom a koncom merania po odčítaní DC zložky bola 407 μ V , t.j. 0,509mg.

3.4 Meranie s NI-USB 2615 s kanálmi pripojenými ku AGND



Obrázok č. 3.22 Schéma zapojenia merania offsetu s kanálmi pripojenými na zem

Použité meracie prístroje

NI-USB 6215

HP34401A

Teplotná komora

PC

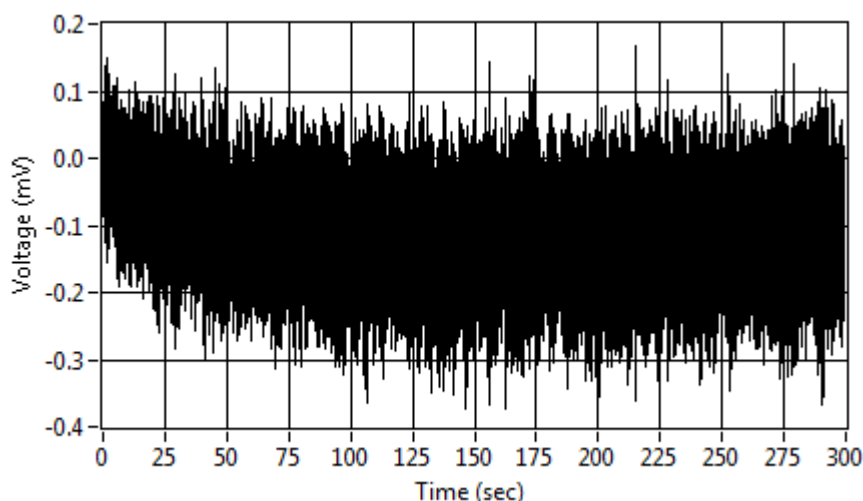
Softvér na spracovanie LabView 11

Nepájivé pole, vodiče

3.4.1 ADXL 193

Priebeh výstupu X_{out} je zobrazený na obrázku č.3.23. Schéma zapojenia akcelerometra je zobrazená v predošlej kapitole na obrázku č.3.8.

Hodnota výstupu akcelerometra sa ustálila na napätí 2,484V a v porovnaní s meraním so spoločne prepojeným kanálmi je rozdiel 0,3mV. Rozptyl výstupu po ustálení bol 39,1mg. Zmena medzi počiatočnou a koncovou hodnotou merania bola 100 μ V, t.j. 12,6mg. Hodnota sa ustálila približne po 100 sekundách.



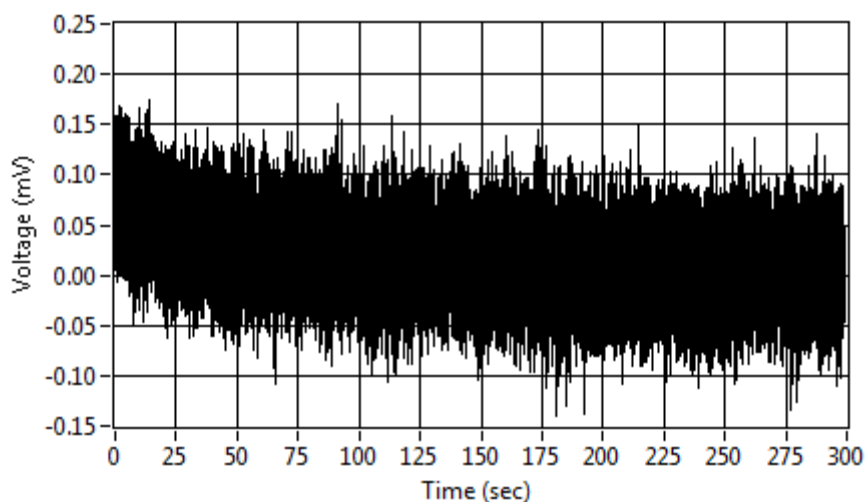
Obrázok č. 3.23 ADXL193 priemerovaný výstup X_{out} s gnd

3.4.2 ADXL 335

Napájacie napätie bolo $2,999012 \pm 0,00001V$. Teplota v komore sa pohybovala na $25 \pm 0,018^{\circ}C$. Zmena oproti napájaciemu napätiu pri predošlom meraní bola 123 μ V. Schéma zapojenia akcelerometra je zobrazená na obrázku č.3.2.

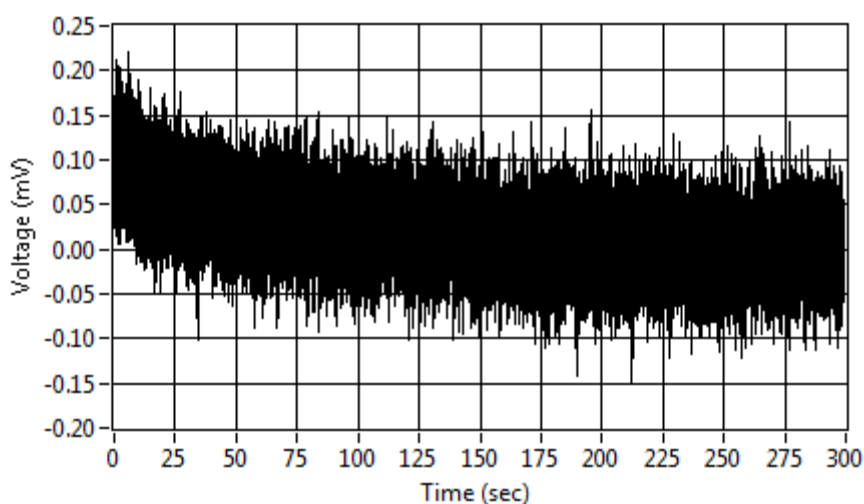
Hodnota offsetu sa po 300 sekundách ustálila na hodnote 1,509V. Priebeh výstupu exponenciálne klesal a ustálil sa približne v čase 200 sekúnd. V predošlom meraní sa ustálila v čase okolo 225 sekúnd. Rozdiel medzi počiatočnou a koncovou hodnotou bol 92 μ V, t.j. 0,307mg. Výrobca udáva zmenu offsetu 1 mg/ $^{\circ}C$. Pri zmene 0,02 $^{\circ}C$

v teplotnej komore dôjde ku zmene 0,02 mg. Keďže hodnota napájacieho napätia bola nižšia o 123 μV , priebeh mal menší spád, tým pádom aj menší rozdiel medzi počiatočnou a koncovou hodnotou výstupu. Rozptyl výstupnej hodnoty po ustálení bol 0,768mg.



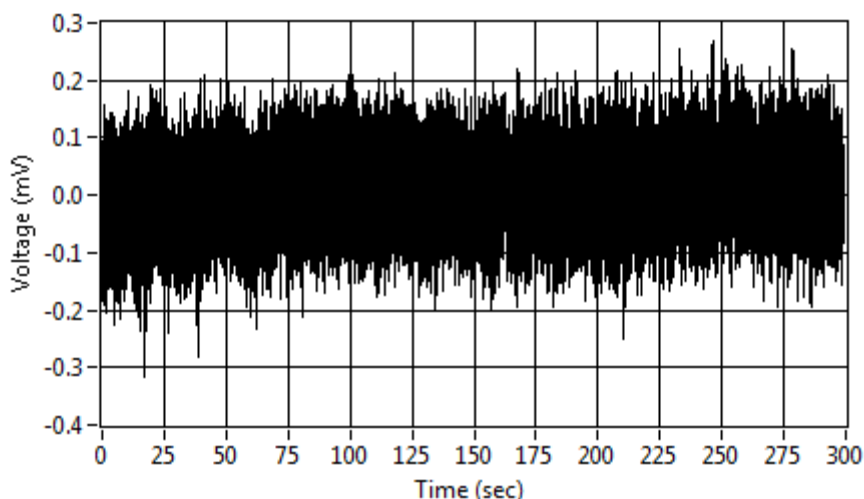
Obrázok č. 3.24 ADXL335 priemerovaný výstup Xout s gnd

Hodnota výstupu Y_{out} sa po 300 sekundách ustálila na hodnote 1,490V. Zmena oproti predchádzajúcemu meraniu je 60mV. Rozdiel medzi počiatočnou a koncovou hodnotou výstupu po odstránení DC zložky bol 103 μV , t.j. 0,345mg. Rovnako ako pri X_{out} aj Y_{out} má exponenciálnu závislosť na vnútornej teplote akcelerometra. Rozptyl hodnôt výstupu bol 0,768mg. Hodnota vnútornej teploty sa ustálila približne po 200s, takisto ako v predošlom meraní.



Obrázok č. 3.25 ADXL335 priemerovaný výstup Yout s gnd

Výstup Z_{out} mal hodnotu statického zrýchlenia 1g. Výrobca neudáva hodnotu výstupu pri statickom zrýchlení 1g. Výstupná hodnota sa ustálila na 1,811V. Zmena v porovnaní so Z_{out} s predchádzajúcim meraním bola $700\mu V$. Zmena medzi počiatočnou a koncovou hodnotou merania bola takisto $40\mu V$. Zmena odpovedá zrýchleniu $0,133mg$. Rozptyl bol $2,08mg$. Pribeh zobrazený na obrázku č.3.26 má logaritmický charakter s narastajúcou tendenciou. Hodnota výstupu sa ustálila približne v čase 100s.



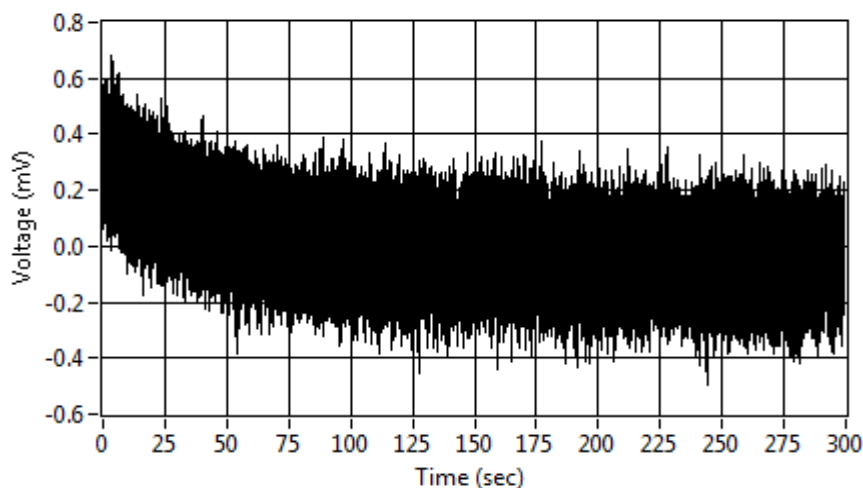
Obrázok č. 3.26 ADXL335 priemerovaný výstup Z_{out} s gnd

3.4.3 MMA7260QT

Schéma zapojenia akcelerometre je zobrazená na začiatku kapitoly 3.3.1 na obrázku č.3.4. Podmienky merania boli rovnaké ako pri meraní offsetu s prepojenými kanálmi. Parametre sú popísané v kapitole 3.3.2.4.

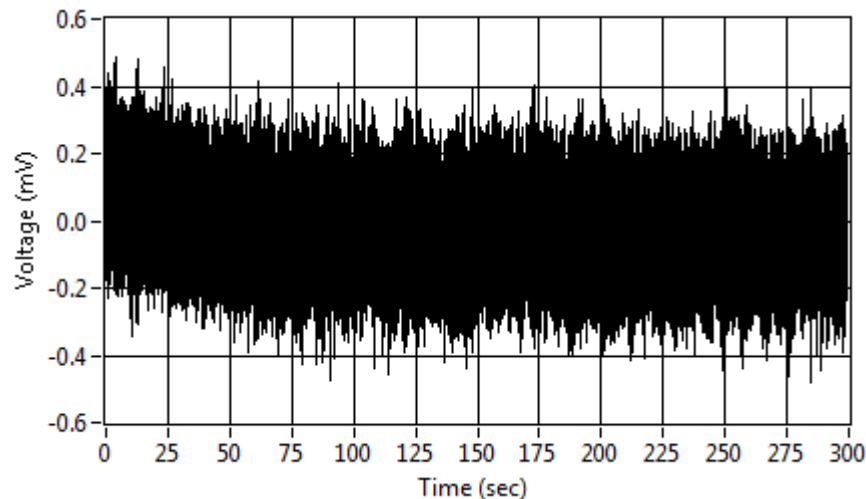
Hodnota napájacieho napätia bola $3,299240 \pm 0,00001V$. Rozdiel v napájaní s predchádzajúcim meraním činil $321\mu V$. Teplota v komore sa pohybovala na hodnote $25 \pm 0,018^{\circ}C$.

Hodnota výstupu X_{out} , ktorý je zobrazený na obrázku č.3.27, sa po 300 sekundách ustálila na hodnote 1,649V. Rozdiel s predošlým meraním bol 9,6 mV. Od výrobcu sa hodnota líšila o 0,4mV. Rozptyl výstupu bol 10,5mg. Po odstránení DC zložky a spriemerovaní bola zmena medzi počiatočnou a koncovou hodnotou výstupu $486,3\mu V$, čo je zmena zrýchlenia $0,61mg$. Výrobca udáva zmenu $0,6 mg/^{\circ}C$, ak predpokladám zmenu o $0,018^{\circ}C$, offset sa zmení o $0,011mg$. Pribeh výstupu má exponenciálny charakter. Hodnota výstupu sa ustáli približne po 200 sekundách.



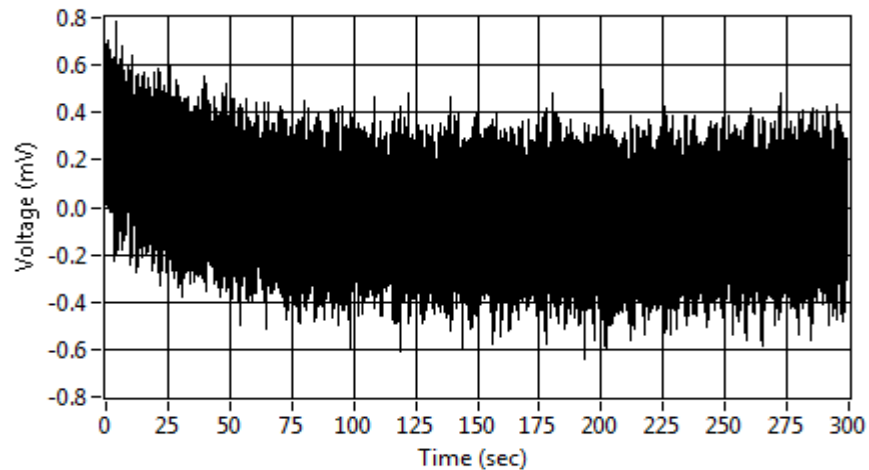
Obrázok č. 3.27 MMA7260QT priemerovaný výstup Xout s gnd

Priebeh výstupu Y_{out} je zobrazený na obrázku č.3.28. Priebeh výstupu zo začiatku lineárne klesá a okolo času 100 sekúnd sa ustálil. V čase 300 sekúnd dosahoval hodnotu po spriemerovaní 1,744V. Rozdiel s predošlou hodnotou bol 83mV a hodnotou výrobcu 94mV. Zmena medzi počiatočnou a koncovou hodnotou výstupného priebehu bola v tomto prípade 146 μ V, čo odpovedá zmene 0,18mg. Rozptyl výstupu po ustálení bol 19,7mg.



Obrázok č. 3.28 MMA7260QT priemerovaný výstup Yout s gnd

Hodnota výstupu Z_{out} sa po prepočte ustálila na hodnote 1,458V. Medzi predchádzajúcim meraním bol rozdiel 16 mV a výrobcom udávanou hodnotou je rozdiel 0,608V. Priebeh má exponenciálny charakter. Výstup sa ustálil približne v čase 150s. Zmena medzi počiatočnou a koncovou hodnotou bola 434 μ V, pri citlivosti 800 mV/g predstavuje zmenu 0,542mg. Rozptyl výstupnej hodnoty po ustálení priebehu bol 7,16mg.



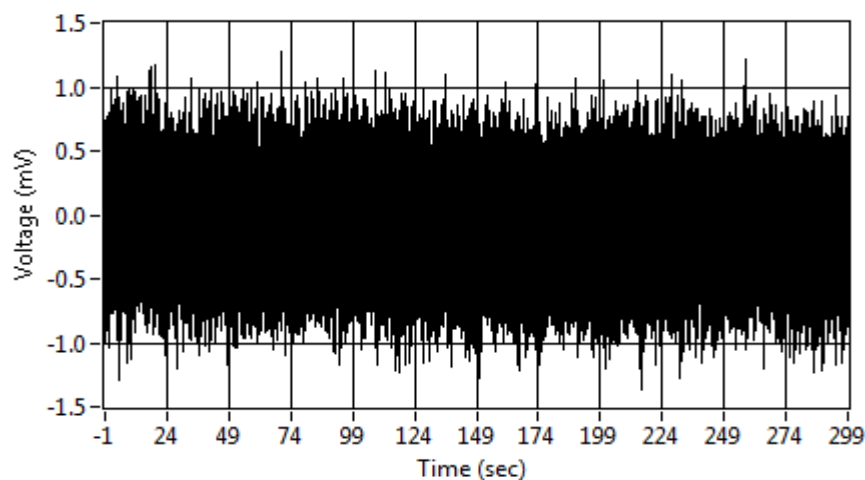
Obrázok č. 3.29 MMA7260QT priemerovaný výstup Yout s gnd

3.4.4 MMA 7361L

Schéma zapojenia akcelerometra je zobrazená na obrázku 3.18. Parametre merania zostali rovnaké ako pri meraní so spoločným kanálom. Napájanie bolo nastavené na 3,3V. Výrobca udáva hodnotu pri nulovom statickom zrýchlení 1,65V. Citlivosť akcelerometra je 800 mV/g. Výrobca udáva zmenu offsetu $\pm 0,5 \text{ mg}/^{\circ}\text{C}$.

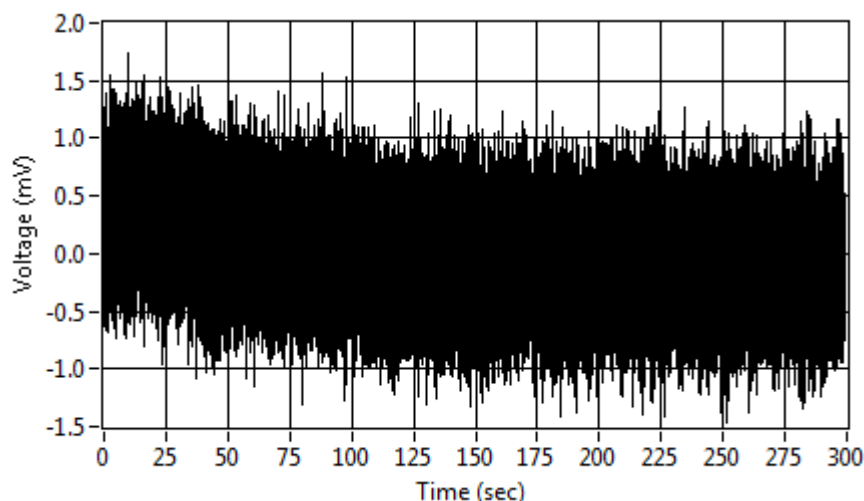
Výstup X_{out} som nevyhodnocoval. Na výstupných dátach sa objavovali hodnoty, ktoré nezodpovedali reálnym hodnotám. Chyba bola pravdepodobne spôsobená zlým pripojením vodiča ku doske s akcelerometrom.

Hodnota výstupu Y_{out} sa ustálila na hodnote 1,749V. Medzi predchádzajúcim meraním je rozdiel 19mV a s výrobcom udávanou hodnotou je rozdiel 99mV. Pribeh mal lineárny charakter. Výstup bol od začiatku ustálený a v čase sa nemenil. Zmena medzi počiatočnou a koncovou hodnotou bola 22 μV , pri citlivosti 800 mV/g predstavuje zmenu 0,027 mg. Pribeh je zobrazený na obrázku č.3.30.



Obrázok č. 3.30 MMA7361L priemerovaný výstup Yout s gnd

Pri statickom zrýchlení 1g výrobca udáva hodnotu výstupu Z_{out} 2,45V. Nameraná hodnota bola po 300 sekundách 2,058V. Rozdiel bol 392mV a s predchádzajúcim meraním 108mV. Hodnota výstupu sa ustálila po 150s. Zmena medzi počiatkom merania a koncom merania po odčítaní DC zložky a spriemerovaní bol 390 μ V, t.j. 0,488mg. Rozptyl hodnôt po ustálení bol 34,6mg.



Obrázok č. 3.31 MMA7361L priemerovaný výstup Z_{out} s gnd

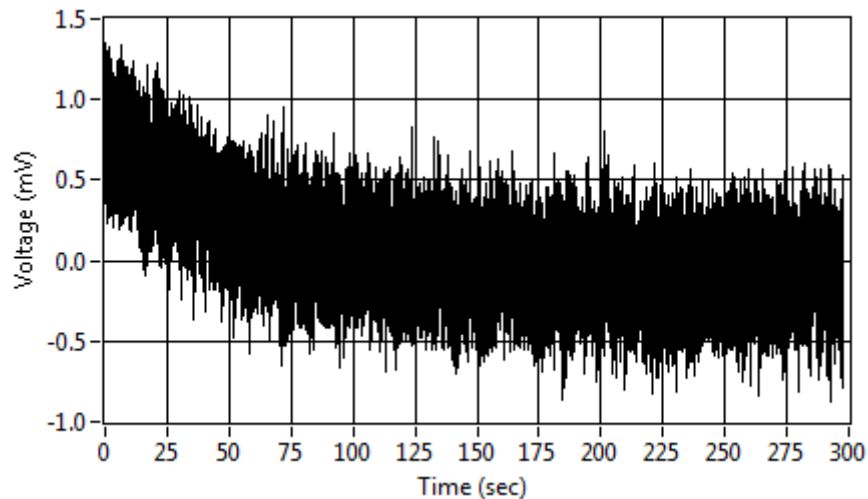
3.4.5 MEMSIC MXA6500

MEMSIC MXA6500 je dvojosý low-cost akcelerometer. Merací rozsah akcelerometra je $\pm 1g$ a citlivosť 500mV/g pri napájaní 3V a teplote 25°C. Snímač dokáže merať ako dynamické zrýchlenie (vibrácie), tak aj statické zrýchlenie (gravitáciu). Tento akcelerometer pracuje na tepelnom princípe a nepotrebuje žiadnu seizmickú hmotnosť. Akcelerometer je odolný voči zničeniu pri zrýchleniach väčších ako 50 000 g. Dokáže zaznamenať zrýchlenie ± 1 mg pri šírke pásma 1Hz. Výrobca udáva zmenu offsetu 1,5 mg/°C.[26]

Napájacie napätie akcelerometra, merané pomocou multimetra HP34401A, bolo $2,999373 \pm 0,00001V$. Teplota v komore bola $25 \pm 0,02^{\circ}C$. Pri daných podmienkach a nulovom zrýchlení výrobca udáva offset 1,25 V. [26]

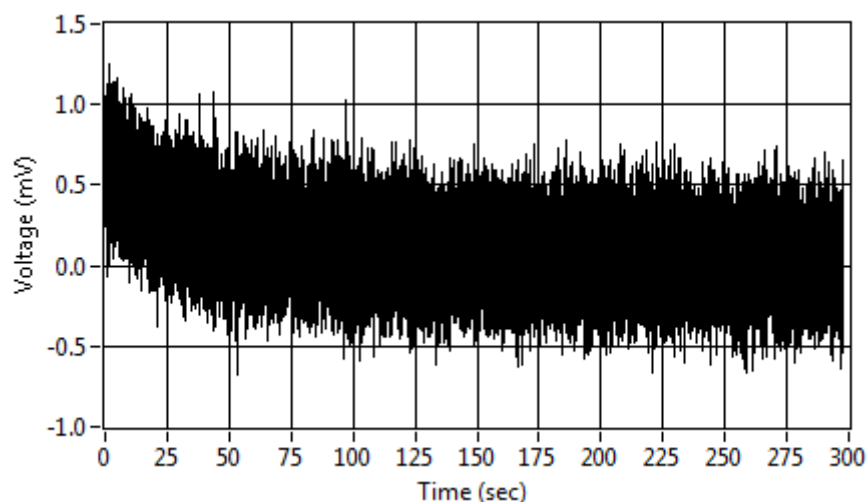
Meranie akcelerometra MEMSIC MXA6500 prebiehalo súčasne s akcelerometrom Panasonic G3S.

Priebeh výstupu X_{out} je zobrazený na obrázku č.3.32. Priebeh exponenciálne klesá a ustáli sa v čase okolo 175 sekúnd. Výstup sa po 300 sekundách ustálil na hodnote 1,262V. Rozdiel s hodnotou, ktorú udáva výrobca bol 12mV. Zmena medzi počiatkovou a koncovou hodnotou bola 1,26mV, čo predstavuje zrýchlenie 2,52mg. Rozptyl hodnôt po ustálení snímača a prepočte na zrýchlenie bol 4,67mg.



Obrázok č. 3.32 MEMSIC MXA6500 priemerovaný výstup Xout s gnd

Výstup akcelerometra Y_{out} je zobrazený na obrázku č.3.33. Takisto ako výstup X_{out} , tak aj Y_{out} exponenciálne klesá. Výstup sa ustálil na hodnote 1,245V. Rozdiel s výrobcom udávanou hodnotou bol 5mV. Hodnota výstupu sa ustálila po 150s. Zmena medzi počiatočnou a konečnou hodnotou bola $631\mu V$, čo predstavuje zmenu zrýchlenia $1,26mg$.

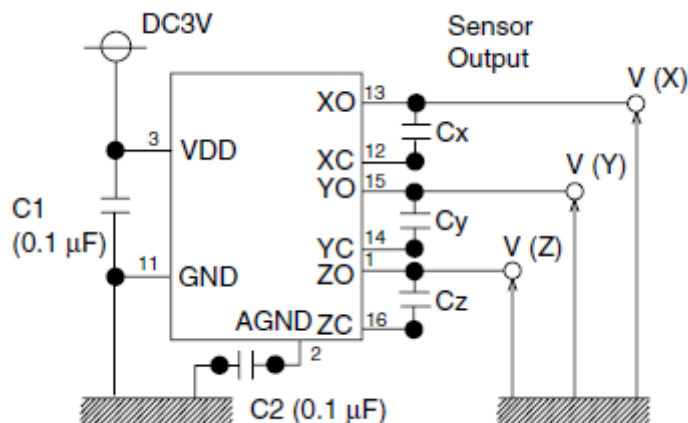


Obrázok č. 3.33 MEMSIC MXA6500 priemerovaný výstup Yout s gnd

3.4.6 Panasonic GS3 61231

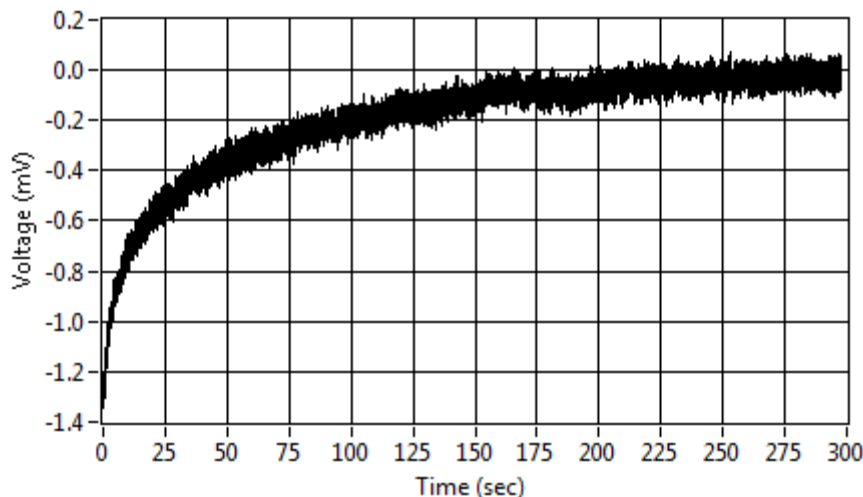
GS3 61231 je trojosí akcelerometer od firmy Panasonic. Akcelerometer pracuje na piezorezistívnom princípe. Merací rozsah akcelerometra je $\pm 2g$. Prúdový odber akcelerometra pri napájaní 3V udáva výrobca 1,7mA. Citlivosť akcelerometra pri teplote $25^{\circ}C$ a napájacom napätí 3V je $500mV/g$. Šírka pásma akcelerometra bola

nastavená pomocou kondenzátorov s kapacitou 8,2 nF na 200 Hz. Na obrázku č.3.34 je zobrazená schéma zapojenia akcelerometra GS3 61231. Hodnota offsetu sa má ustáliť na hodnote 1,5 V. [25]



Obrázok č. 3.34 Schéma zapojenia akcelerometra GS3 61231[25]

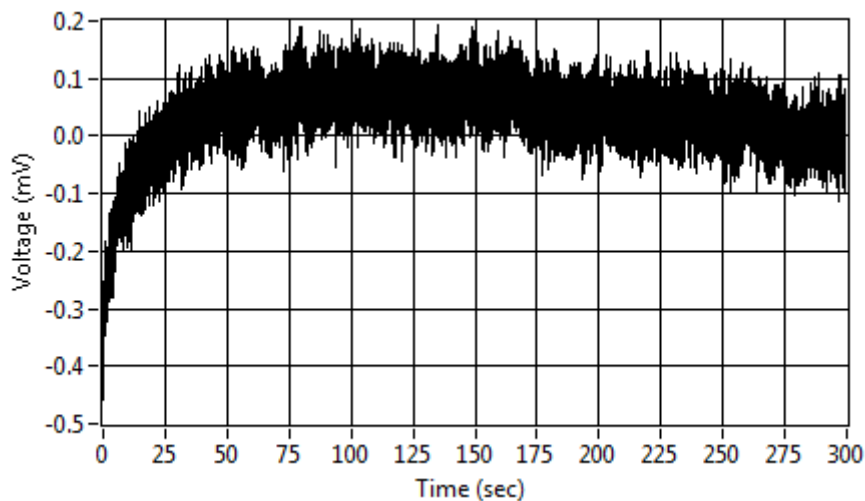
Výstup X_{out} je zobrazený na obrázku č.3.35. Priebeh výstupu logaritmicky narastal a za čas 300 sekúnd sa neustálil. Hodnota výstupu po 300 sekundách dosiahla 1,453 V. Rozdiel oproti výrobcom udávanej hodnote bol 47mV. Zmena medzi počiatkovou a koncovou hodnotou bola 1,236mV, čo predstavuje zmenu po prepočte na zrýchlenie 2,47 mg. Rozptyl hodnôt po ustálení výstupu bol 3,62mg.



Obrázok č. 3.35 GS3 61231 priemerovaný výstup Xout s gnd

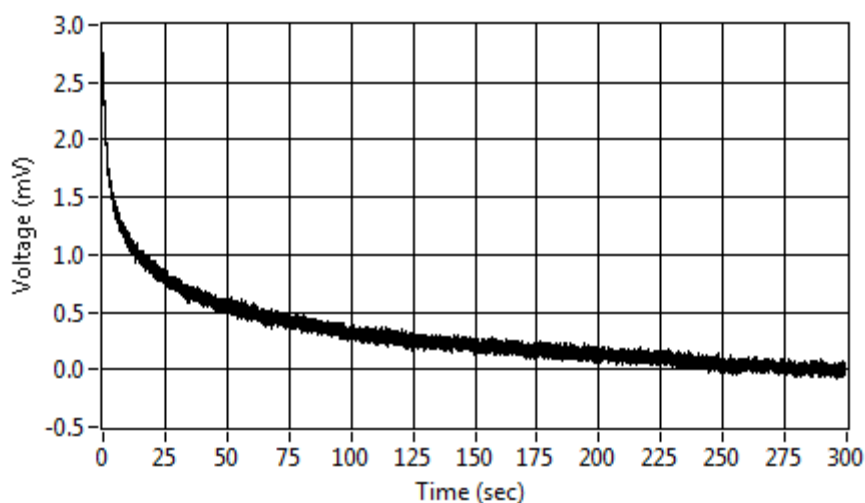
Ďalším v poradí je výstup akcelerometra GS3 Y_{out} , ktorý je zobrazený na nasledujúcom obrázku č.3.35. Jeho priebeh logaritmicky narastal, v čase 100 sekúnd začal lineárne klesať, až sa ustálil v čase približne 275 sekúnd na hodnote 1,466V. Rozdiel medzi nameranou a výrobcom udávanou hodnotou činil 34mV. Zmena medzi

počiatočnou a konečnou hodnotou merania bola $276\mu\text{V}$, t.j. po prepočte 0,553 mg. Po ustálení výstupu a prepočte na zrýchlenie bol rozptyl hodnôt akcelerometra 3,42mg.



Obrázok č. 3.35 GS3 61231 priemerovaný výstup Yout s gnd

Posledným výstupom akcelerometra GS3 bol Z_{out} , ktorý je zobrazený na obrázku č.3.36. Na rozdiel od predchádzajúcich dvoch výstupov jeho výstup exponenciálne klesal. Posledná nameraná hodnota bola 2,118 V. Zmena medzi počiatočnou a koncovou hodnotou výstupu bola 2,265 mV. Táto zmena predstavuje zrýchlenie 4,53 mg. Hodnota statického zrýchlenia osi Z bola 1g. Pre túto možnosť výrobca neudáva offset akcelerometra.



Obrázok č. 3.36 GS3 61231 priemerovaný výstup Zout s gnd

3.5 Meranie offsetu s kartou PXI 4462

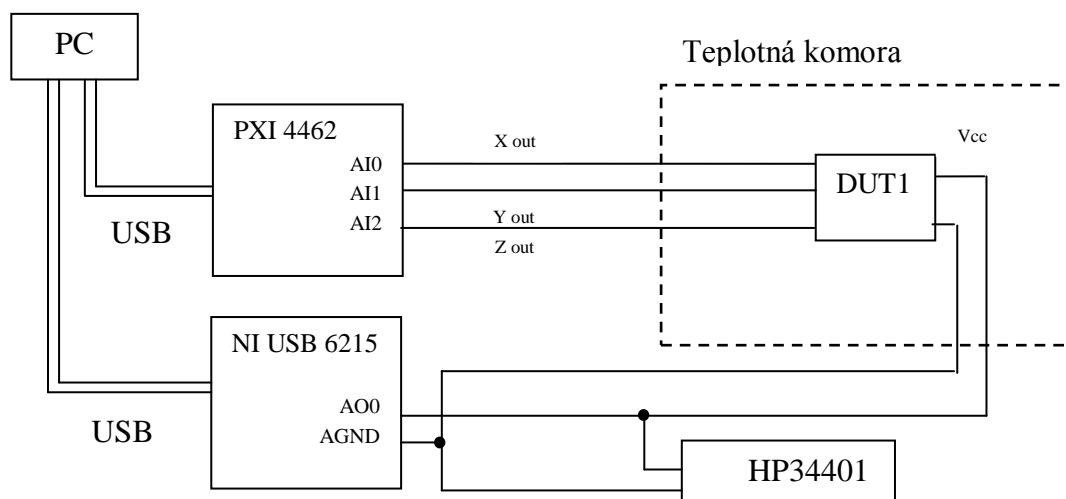
Rozdiel medzi predošlými meraniami je ten, že namiesto napájania a aj spracovávanía dát zo snímačov pomocou karty NI-USB 6215, som na spracovávanie dát použil kartu PXI 4462.

Jedná sa o 24 bitovú kartu, pričom NI-USB 6215 bola 16 bitová karta. Cenový rozdiel medzi kartami je okolo 100 000Kč. PXI 4462 obsahuje hardverový antialiasing filter. Hodnota filtra sa počíta z nastavenej hodnoty vzorkovacej frekvencie. PXI4462 má 4 diferenciálne analógové vstupy.

Meraním som chcel overiť správnosť a opakovateľnosť predošlých meraní. Schéma zapojenia je zobrazená na obrázku č.3.37. Pri meraní boli zachované rovnaké podmienky ako pri meraniach s kartou NI-USB 6215. Teplota v komore sa udržiavala na hodnote 25°C a napájacie napätie som volil podľa katalógového listu výrobcu.

Použité meracie prístroje

NI USB 6215
NI PXI 4462
NI PXI 1033
HP34401A
Teplotná komora
PC
Softvér na spracovanie LabView 11
Napájivé pole, vodiče

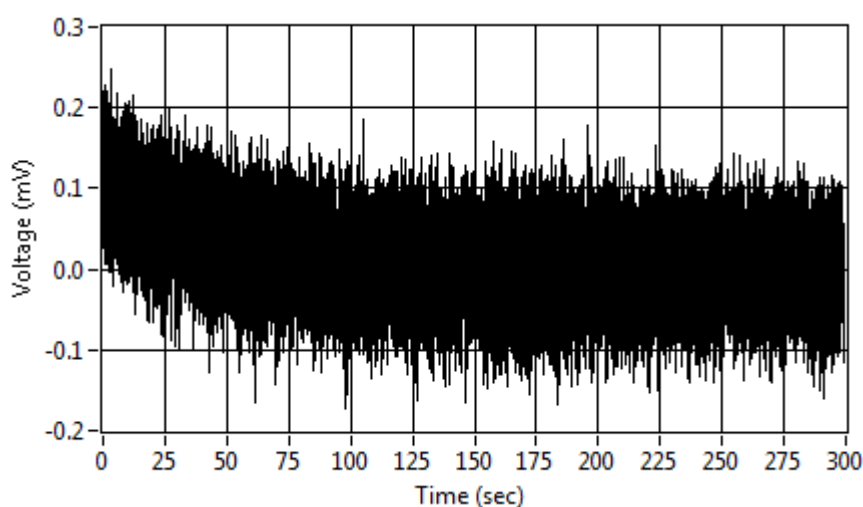


Obrázok č. 3.37 Schéma zapojenia merania offsetu s kartou PXI 4462

3.5.1 ADXL 193

Napájacie napätie akcelerometra bolo 5V. Teplota v komore sa pohybovala na $25 \pm 0,02^\circ\text{C}$. Keďže šírka pásma akcelerometra je 400Hz, zvolil som vzorkovaciu frekvenciu 1kHz.

Priebeh výstupu ADXL 193 X_{out} je zobrazený na obrázku č.3.38. V prvej tretine výstup exponenciálne klesá. Hodnota výstupu sa ustálila v čase okolo 100 sekúnd. Priebeh je skoro zhodný s priebehom v meraní so spoločne prepojenými susednými kanálmi. Rozptyl hodnôt, na ktorých sa výstup ustálil, bol 45,78mg. Stredná hodnota ustálenie výstupu je 2,4778V. Rozdiel medzi počiatočnou a koncovou hodnotou bol 122 μV , čo predstavuje 15,25mg.

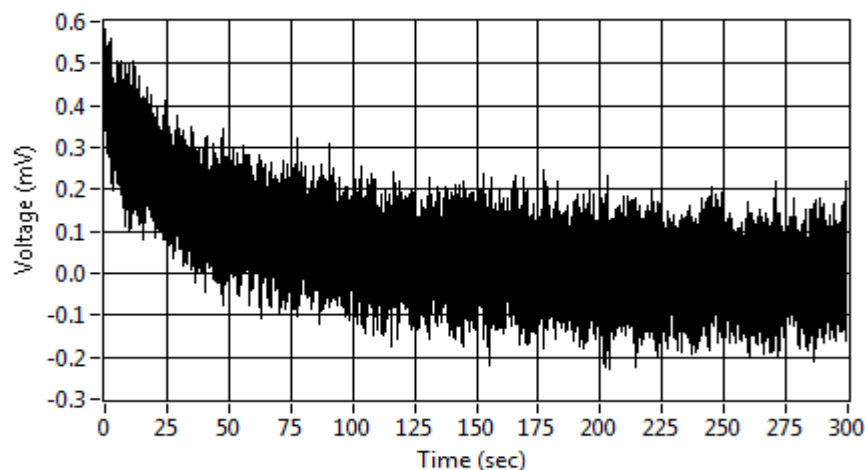


Obrázok č. 3.38 ADXL 193 priemerovaný výstup PXI4462

3.5.2 MMA 7260QT

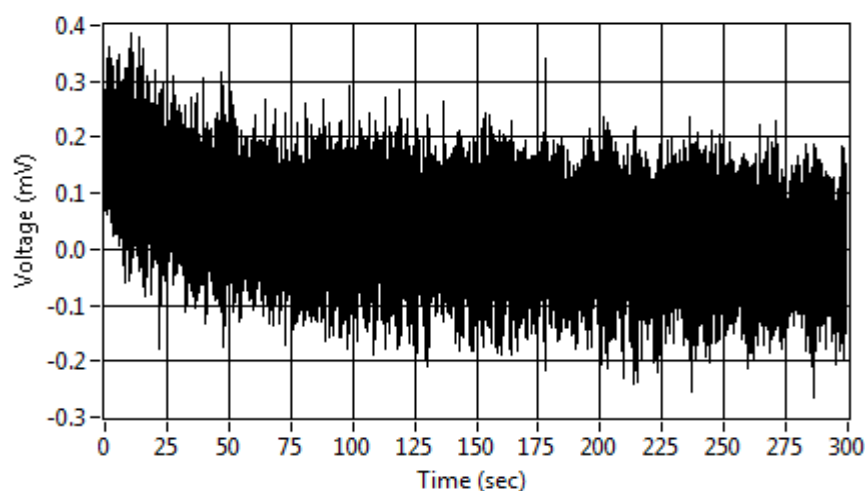
Napájacie napätie zmerané pomocou voltmetra HP34401A bolo $3,2986376 \pm 0,00001\text{V}$. Teplota v komore sa počas merania pohybovala na hodnotách $25 \pm 0,019^\circ\text{C}$. Keďže šírka pásma akcelerometra bola pre výstupné osi X a Y 350Hz a pre os Z 150Hz, vzorkovaciu frekvenciu som volil 1kHz.

Na obrázku č.3.39 je zobrazený výstup akcelerometra X_{out} . Priebeh exponenciálne klesal a hodnota výstupu sa ustálila približne okolo 225 sekundy. Drift offsetu sa pohyboval po 72 meraniach v rozmedzí 798 μg . Hodnota výstupu po spriemerovaní sa ustálila na 1,642V. Rozdiel medzi Počiatočnou a koncovou hodnotou bol 450 μV , po prepočte 564 μg .



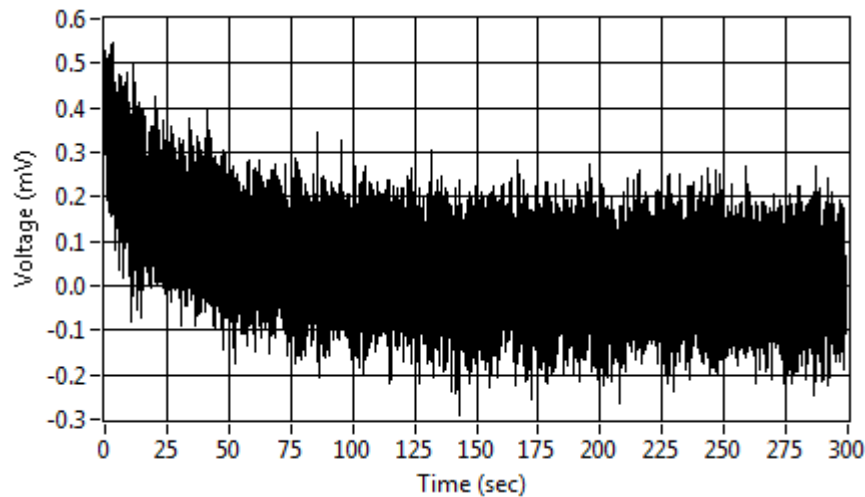
Obrázok č. 3.39 MMA 7260QT Xout priemerovaný výstup PXI4462

Na obrázku č.3.40 je zobrazený výstup Y_{out} . Priebeh výstupu exponenciálne klesal. Výstup sa viac menej ustálil až na 230 sekunde. Stredná hodnota ustálenej hodnoty bola 1,621V. Rozptyl ustálených hodnôt bol 1,7mg. Rozdiel medzi počiatočnou a koncovou hodnotou bol 217,7 μ V. Pri citlivosti 800mV/g to predstavuje 272 μ g.



Obrázok č. 3.40 MMA 7260QT Yout priemerovaný výstup PXI4462

Posledným z premeraných výstupov akcelerometra bol Z_{out} , ktorého priebeh je zobrazený na obrázku 3.41. Priebeh exponenciálne klesal a v čase 200 sekúnd sa ustálil. Rozptyl ofsetu po prepočte bol 1,16mg. Hodnota napätia po ustálení a následnom priemerovaní hodnôt bola 1,442V.

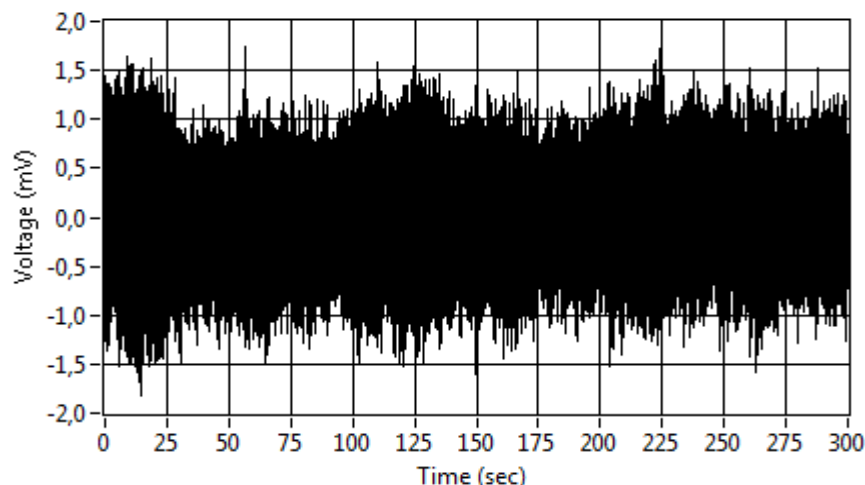


Obrázok č. 3.41 MMA 7260QT Zout priemerovaný výstup PXI4462

3.5.3 MMA 7361L

Hodnota napájacieho napätia akcelerometra bola $3,298762 \pm 0,00001V$. Teplota v komore sa pohybovala na hodnote $25 \pm 0,018 ^\circ C$.

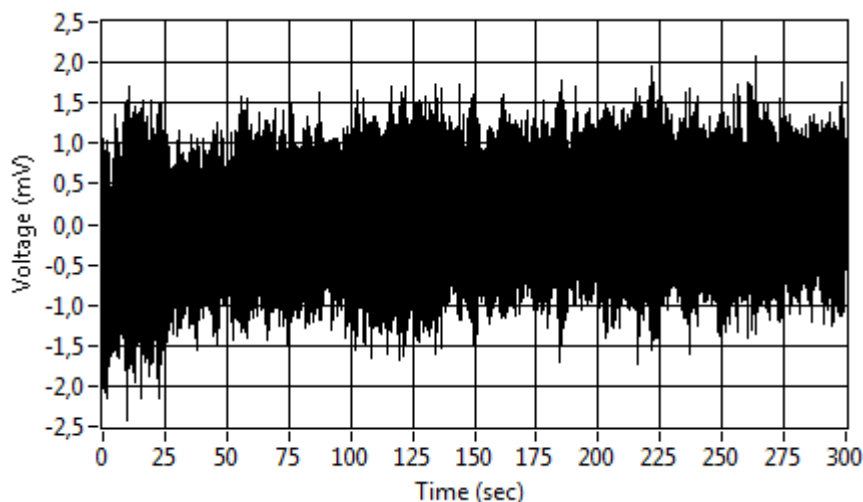
Na obrázku č.3.42 je zobrazený priebeh výstupu X_{out} . Priebeh má mierne narastajúci charakter. Hodnota sa prakticky neustálila, ale stále mierne narastala. Rozptyl hodnôt, na ktorých na výstup po 72 iteráciách bol 16,59mg. Priemerná hodnota výstupu bola 1,372V. Aj napriek tomu, že mierny nárast nie je taký zreteľný, tak zmena medzi počiatočnou a koncovou hodnotou po odčítaní DC a spriemerovaní bola 121 μV . Pri citlivosti akcelerometra 800mV/g, zodpovedala hodnota zmene zrýchlenia 152 μg .



Obrázok č. 3.42 MMA 7361L Xout priemerovaný výstup PXI4462

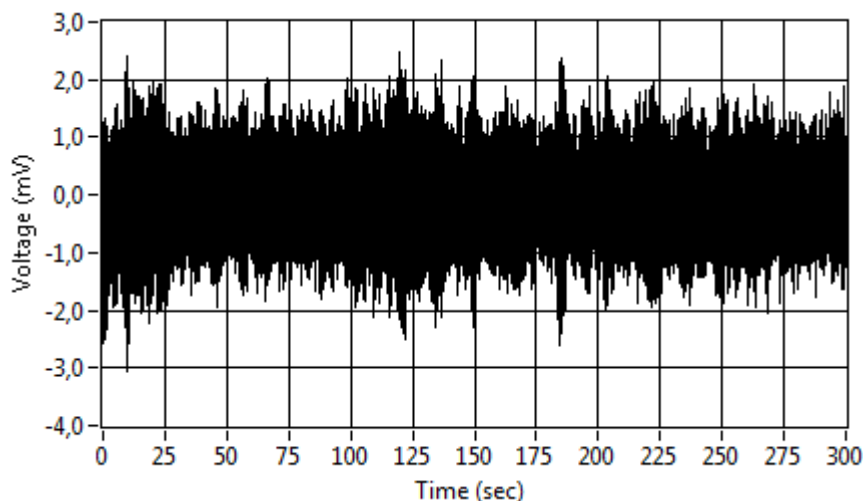
Na ďalšom obrázku 3.43 je zobrazený priebeh výstupu Y_{out} . Výstup, tak ako v predchádzajúcom prípade výstupu X_{out} , má mierne narastajúci charakter v prvej

polovici priebehu, ktorého hodnota sa ustálila približne v čase 200s. Rozptyl hodnôt výstupu po ustálení bol 2,556mg. Hodnota výstupu po prepočte bola 1,748V. Zmena medzi počiatočnou a koncovou hodnotou dosahovala niekoľko násobne vyššie hodnoty ako pri predošlom výstupe, a to 735 μ V, čo po prepočte zodpovedá hodnote 919 μ g.



Obrázok č. 3.43 MMA 7361L Yout priemerovaný výstup PXI4462

Na poslednom obrázku č.3.44 je zobrazený výstup akcelerometra MMA7361 Z_{out} . Jeho priebeh zaznamenal mierny nárast v prvých 50 sekundách, a potom sa ustálil a prakticky sa nemenil. Hodnota rozptylu bola 4,51mg. Zmena medzi počiatočnou a koncovou zmenou vnútornej teploty predstavovala zmenu na výstupe 496 μ V, čo predstavuje zmenu výsledného zrýchlenia o 620 μ g.



Obrázok č. 3.44 MMA 7361L Zout priemerovaný výstup PXI4462

Výstupy snímača dosahovali podobné hodnoty pri zmene vnútornej teploty, čo sa dá predpokladať, ale výrazný rozdiel rozptylu hodnôt na výstupe po opätovnom zapínaní.

4 ZHODNOTENIE

Na nasledujúcich obrázkoch 4.1 až 4.3 sú zobrazené tabuľky s výsledkami meraní. Všetky tri merania dosiahli podobné výsledky. Z výsledkov sa dá usúdiť, že meranie je opakovateľné, avšak je dôležité mať na vstupe totožné napájacie napätie, odizolovať tepelnú komoru od vibrácií a zvýšiť ako aj počet iterácií, tak aj dobu ustálenia snímača.

Ako vidno z hodnôt zmien počiatkovej a koncovkej hodnoty výstupu, snímače zmerané všetkými spôsobmi dosiahli veľmi podobné výsledky a mierne zmeny mohli byť spôsobené práve zmenou vstupného napätia. Karta NI-USB 6215 bola schopná držať konštantné napätie na výstupe, ale len v rámci jednej inicializácie. Napríklad pri meraní s prepojenými kanálmi a s kanálmi pripojenými ku AGND karty bola zmena medzi napájacími napätiami 123 μ V.

Z výsledkov je ďalej vidno, že hodnota rozptylu hodnôt je pri každom meraní iná tzn., že jej hodnota má náhodný charakter. Je možné, že predĺžením dĺžky merania na týždeň a možno aj dlhšie, by sa získala dostatočná štatistická vzorka meraní, pri ktorej by rozptyl hodnôt dosahoval rovnaké výsledky.

NI-USB 6215 prepojené susedné kanály						
		Fyzikálny princíp	Zmena medzi počiatkovou a koncovou hodnotou výstupu	Rozptyl výstupu po ustálení	Stredná hodnota výstupu po ustálení	Čas ustálenia
Snímače	Os	-	(mg)	(mg)	(V)	(s)
ADXL193	X	kapacitný	16,00	47,30	2,483	60
ADXL321	Y	kapacitný	1,65	8,40	-	-
ADXL335	X	kapacitný	0,38	2,85	1,499	225
	Y		0,29	1,21	1,546	200
	Z		0,22	1,41	1,810	100
MMA7260QT	X	kapacitný	0,59	0,84	1,659	250
	Y		0,34	1,70	1,661	250
	Z		0,58	0,88	1,442	240
MMA7361L	X	kapacitný	0,13	6,72	1,557	0
	Y		0,56	2,59	1,730	-
	Z		0,51	3,23	2,166	50

Obrázok č. 4.1 Vyhodnotenie merania s prepojenými susednými kanálmi

V prvom prípade som premeral 5 akcelerometrov od dvoch firiem. Jednalo sa o akcelerometre pracujúce na kapacitnom princípe. Zmerané boli prakticky tri parametre snímačov.

Ako prvý bola opakovateľnosť snímača, ktorá vyjadruje rozptyl hodnôt na akých sa snímač po opätovnom zapínaní ustaloval. V ideálnom prípade by to bola stále ta istá

hodnota. Hodnoty sú uvádzané v mg, aby sa snímače dali medzi sebou porovnať. Najhoršie dopadol jednoosí snímač ADXL193, ktorý mal od druhého najhoršieho snímača hodnotu o 40mg vyššiu. Takisto najhoršie dopadol aj v zmene medzi počiatočnou a koncovou hodnotou, ktorá predstavovala vplyv zmeny vnútornej teploty na výstup snímača, tam mal hodnotu 16mg. Naopak uňho došlo k najrýchlejšiemu ustáleniu teploty v čase 60s. Druhý najhorší snímač z hľadiska zmeny vplyvu vnútornej teploty na výstup bol ADXL321, ktorý dosiahol hodnotu 1,65mg. Jeho výstup sa ale ani po 300 sekundách neustálil a naďalej klesal. Najlepšie dopadli snímače ADXL335 a MMA7260QT, ktoré mali podobné výsledky. MMA 7361 dosiahol porovnateľné výsledky v zmene medzi počiatočnou a koncovou hodnotou, ale mal väčší rozptyl hodnôt na výstupe.

NI-USB 6215 kanály pripojené na AGND						
		Fyzikálny princíp	Zmena medzi počiatočnou a koncovou hodnotou výstupu	Rozptyl výstupu po ustálení	Stredná hodnota výstupu po ustálení	Čas ustálenia
Snímače	Os	-	(mg)	(mg)	(V)	(s)
ADXL193	X	kapacitný	12,600	39,10	2,484	100
ADXL335	X	kapacitný	0,307	0,77	1,509	200
	Y		0,345	0,77	1,49	200
	Z		0,130	2,08	1,811	100
MMA7260QT	X	kapacitný	0,610	10,50	1,649	200
	Y		0,180	19,70	1,744	100
	Z		0,542	7,16	1,458	150
MMA7361L	X	kapacitný	-	-	-	-
	Y		0,027	39,60	1,749	-
	Z		0,488	34,60	2,059	150
MEMSIC MXA6500	X	tepelný	2,520	4,67	1,262	175
	Y		1,260	2,53	1,245	150
GS3 61231	X	piezoretistívny	2,470	3,62	1,453	-
	Y		0,553	3,42	1,466	-
	Z		4,530	10,40	2,118	-

Obrázok č. 4.2 Vyhodnotenie merania s kanálmi pripojenými k AGND

V druhom meraní som použil 6 akcelerometrov od štyroch rôznych výrobcov. A zameral som sa aj na rozdielny fyzikálny princíp. A6500 od firmy Memsic pracuje na tepelnom princípe a GS3 sensor od Panasonicu na piezorezistívnom princípe.

Rovnako ako v predošlom meraní aj tu vzhľadom na merané parametre dopadol najhoršie ADXL193. U snímačov od firmy freescale výsrobca udáva, že majú na výstupe tepelnú kompenzáciu. Aj napriek tomu, že sú cenovo nižšie ako ADXL 335 sú schopné dosahovať podobné výsledky ako on. Ich hodnota sa vždy pohybovala

najhoršie na 0,61mg a u ADXL 335 0,38mg. Naopak v tomto meraní dopadol ako druhý najhorší, čo sa týka rozptylu výstupu MMA7361, ktorého hodnoty sa pohybovali medzi 30 až 40mg. A ako tretí najhorší dopadol MMA7260QT s rozptylom hodnôt na ose Y 19,7mg.

U snímača A6500, je predpoklad, že má výraznejší vplyv na zmenu teploty. Hodnota zmeny vnútornej teploty sa prejavila na výstupe X zmenou 2,52mg a na ose Y zmenou 1,26mg. Rozptyl offsetu sa pohyboval 4,67 v prípade X a 2,53mg v prípade Y.

Výstup piezorezistívneho snímača GS3 sa ani po 300 sekundách neustálil. Po odčítaní hodnôt dosiahol podobné výsledky ako Memsic A6500. Rozptyl hodnôt dosahoval na výstupoch X a Y hodnoty 3,62 a 3,42 mg, a na výstupe Z 10,4mg. Zmena vnútornej teploty sa na výstupe X prejavila zmenou zrýchlenia 2,47mg, na výstup Y 0,553mg a na výstupe Z 4,53mg.

NI-USB 6215 s PXI 4462						
		Fyzikálny princíp	Zmena medzi počiatočnou a koncovou hodnotou výstupu	Rozptyl výstupu po ustálení	Stredná hodnota výstupu po ustálení	Čas ustálenia
Snímače	Os	-	(mg)	(mg)	(V)	(s)
ADXL193	X	kapacitný	15,250	45,78	2,478	100
MMA7260QT	X	kapacitný	0,564	0,80	1,642	225
	Y		0,272	1,70	1,621	230
	Z		0,463	1,16	1,442	200
MMA7361L	X	kapacitný	0,151	16,59	1,372	-
	Y		0,919	2,56	1,748	200
	Z		0,620	4,51	2,115	50

Obrázok č. 4.3 Vyhodnotenie merania s použitím karty PXI 4462

Celkovo najlepšie dopadol snímač ADXL 335, ktorý dosiahol najlepšie výsledky. Je predpoklad, že mal najnižšiu závislosť na zmene teploty z dôvodu najmenšieho prúdového odberu 350μA a napájania 3V. Jedná sa o kapacitný snímač zrýchlenia.

Ako ďalšie dopadli snímače od firmy Freescale MMA7260, za ním MMA7361. Ich prúdový odber bol 500μA MMA7260 a 400μA MMA7361.

Za nimi bol kapacitný snímač akcelerácie ADXL321, ktorý mal zmenu medzi počiatočnou a koncovou hodnotou výstupu o 1mg vyššiu ako MMA7361 a MMA7260QT. Prúdový odber snímača uvádza výrobca 490μA.

GS3 a Memsic dosiahli podobné výsledky s tým rozdielom, že akcelerometer A6500 sa dokázal ustáliť po 200s a výstup GS3 sa neustálil ani po 300 sekundách merania.

Najhoršie dopadol snímač ADXL193. Zmena zrýchlenia na výstupe po ustálení dosiahla hodnotu 16mg a rozptyl hodnôt na výstupe 47mg.

5 ZÁVER

V teoretickej časti tejto diplomovej práce som rozobral základné fyzikálne princípy inerciálnych snímačov. Popísal som ich základné chyby a meracie modely. Poslednú kapitolu teoretického rozboru som venoval popisu základných meracích metód pre inerciálne snímače.

V praktickej časti som sa rozhodol pre spracovanie merania stability offsetu. Tomuto meraniu som sa venoval vzhľadom na dostupnosť meracích zariadení v laboratóriu. Jednalo sa o statický test, ktorého základným stavebným prvkom meracieho reťazca mala byť regulovateľná komora a zdroj konštantného napätia.

Pre praktickosť merania som použil kartu NI-USB 6215, ktorú som použil ako na zber dát, tak aj na napájanie snímačov. Karta disponuje dvoma analógovými výstupmi, z ktorých každý zvládne prúdový odber 2mA. Táto karta je dosť náchylná na presluchy, preto som sa snažil túto chybu eliminovať a to dvoma spôsobmi.

Ako prvé som pripojil každý výstup zo snímača na dva za sebou nasledujúce vstupy a spracovával som vždy len ten druhý. V druhom prípade som každý druhý kanál pripojil na analógovú zem karty. Týmto spôsobom mala karta získať dostatočný čas na to, aby zaznamenala relevantné dáta. Pre overenie správnosti som realizoval meranie na karte NI-PXI 4462, ktorej hodnoty som považoval za referenčné.

Premeral som sedem akcelerometrov od štyroch výrobcov. Jednalo sa o päť kapacitných, jeden piezorezistívny a jeden tepelný snímač zrýchlenia.

Výsledkom merania boli tri parametre. Prvý bol rozptyl hodnôt, na ktorých sa snímač ustálil po každej iterácii v mg. To je chyba, ktorá vzniká opätovným zapínaním snímača. Po spriemerovaní týchto hodnôt som získal hodnotu offsetu, ktorú som porovnával s hodnotou výrobcu, pokiaľ ju udával, ktorá bola meraná za rovnakých podmienok. Posledným parametrom bola závislosť vnútornej teploty na výstup snímača. Keďže MEMS inerciálne snímače majú vysokú teplotnú závislosť a pri napájaní dochádza k ohrevu, chcel som zistiť, či sa táto zmena prejaví na výstupe a ak áno, tak akým spôsobom. Po odstránení DC zložky z každého merania a následnom spriemerovaní meraní som získal priebeh závislosti výstupu na teplote. Pozoroval som zmenu, ktorú spôsobí teplota na výstupe po pripojení až po koniec iterácie. Hodnotu zmeny som prepočítal na zrýchlenie kvôli lepšiemu porovnaniu medzi snímačmi.

Predpokladal som, že snímače s najväčším odberom budú mať najväčšiu závislosť na vnútornej teplote.

Najlepšie dopadol snímač pracujúci na kapacitnom princípe ADXL335, ktorý mal zároveň aj najmenší prúdový odber. Zmeny medzi počiatočnou a koncovou zmenou výstupu dosahovali hodnoty 0,13 až 0,38mg. Rozptyl hodnôt výstupu mal od 0,88mg až do 2,85mg.

Snímače od Freescale, MMA7260QT a MMA7361 dosahovali podobné výsledky. Mali dobrú odolnosť voči vnútornej zmene teploty, ktorá sa pohybovala od 0,027mg

do 0,919mg. Horšie dopadli s testom opakovateľnosti, kde sa hodnoty MMA 7260QT pohybovali od 0,84 do 19,7mg a MMA7361 od 2,56 do 39,6mg.

Tepelný snímač zrýchlenia MEMSIC A6500 mal hodnoty zmeny výstupu na ose X 1,26 a na Y 2,52mg. Je zrejmé, že dopadol horšie, keďže pri tepelných snímačoch je značná tepelná závislosť a doporučuje sa pridávať externý snímač teploty pre kompenzáciu. Rozptyl hodnôt offsetu sa pohyboval od 2,53 do 4,67mg.

O niečo horšie dopadol piezorezistívny snímač GS3, ktorého hodnoty sa ani po 300s neustálili. Po prepočte hodnôt pri konci intervalu mal zmenu výstupnej závislosti od 0,533mg na výstupe Y až po 4,53mg na výstupe Z. Hodnoty rozptylu hodnôt offsetu mal na výstupoch X a Y okolo hodnoty 3,6mg a na výstupe Z 10,4mg. Tieto dva snímače mali vyšší prúdový odber a to 1,7mA GS3 a 2mA A6500, čo môže byť dôvod horších výsledkov.

Najhoršie dopadol snímač ADXL 193 od firmy analog devices. Hodnota zmeny výstupu počiatočnej a koncovkej hodnoty dosiahla 16mg a rozptyl hodnôt na výstupe sa pohyboval na hodnote 47,3mg.

Meranie so spoločnými kanálmi, ako aj meranie s kanálmi pripojenými k AGND, nemali zásadný rozdiel vo výsledkoch. V porovnaní s meraním na karte PXI 4462 dopadli tiež dobre.

Ako vidno z výsledkov, zásadné zmeny hodnôt nastali v zmene rozptylu offsetu, ktorého hodnoty sa z každým meraním u niektorých snímačov, ako napríklad MMA7260QT výrazne menili. Pre zistenie, či je táto chyba vyčísliteľná odporúčam v ďalšom pokračovaní zvýšiť čas ustálenia aspoň na dvojnásobok a zvýšiť počet meraní pre získanie väčšieho štatistického balíčka dát.

V niektorých meraniach sa prejavili vibrácie okolia. Merací reťazec nebol žiadnym spôsobom odizolovaný od vibrácií, preto do budúcnosti by som odporúčal odizolovať merací reťazec, čo by malo zvýšiť aj opakovateľnosť meraní a aj presnosť.

V poslednom kroku som nemohol overiť napájanie pomocou iného zdroja v dôsledku znefunkčnenia teplotnej komory. Do budúcnosti by som to určite realizoval.

Literatúra

- [1] H.TITTERTON, David; L.WESTON, John. Strapdown Inertial Navigation Technology . 2nd Edition. Herts : The Institution of Electrical Engineers, 2004. 574 s. ISBN 0863413587.
- [2] BAJERS, Fredrik. Inertial Navigation System, AALBORG UNIVERSITY, Automation and Control [online]. 2008, [cit. 2011-12-09]. Dostupný z WWW: <http://www.control.aau.dk/uav/reports/08gr1030a/08gr1030a_student_report.pdf>.
- [3] AGGARWAL, Priyanka, et al. MEMS - Based Integrated Navigation. Norwood : ARTECH HOUSE, 2010. 185 s. ISBN 978-1-60807-043-5.
- [4] EL-SHEIMY, N. A mobile multi-sensor system for GIS applications in urban centers, International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing, 1996. Vol. 31, Part B2: str. 95-100.
- [5] MERHAV, S. Areospace Sensor Systems and Applications, Springer-Verlag New York, Inc. 1996
- [6] EL-SHEIMY, N. ENGO 623 Lecture Notes: *Inertial Techniques and INS/DGPS Integration*, Department of Geomatics Engineering, The University of Calgary, Winter 2003.
- [7] NORTON, Harry N. . HANDBOOK OF TRANSDUCERS. New Jersey : Prentice Hall, 1998. 480 s. ISBN 013382599X.
- [8] HUDÁK, Jozef ; LIPOVSKÝ, Pavol; DRAGANOVÁ, Katarína. Akcelerometre. KLTP [online]. 2009, [cit. 2011-12-09]. Dostupný z WWW: <<http://www.senzorika.leteckafakulta.sk/?q=node/175>>.
- [9] BELIVEAU, A, et al. Evaluation of MEMS capacitive accelerometers. Design & Test of Computers, IEEE [online]. Október-December 1999, 16, [cit. 2011-12-09]. Dostupný z WWW: <<http://ieeexplore.ieee.org/stamp/stamp.jsp?tp=&arnumber=808209>>. ISSN 0740-7475.
- [10] VOJÁČEK, Antonín . Automatizace.hw.cz [online]. 2009-10-11 [cit. 2011-12-09]. Integrované MEMS GYROSKOPY. Dostupné z WWW: <<http://automatizace.hw.cz/integrované-mems-gyroskopy>>.
- [11] VOJÁČEK, Antonín . Automatizace.hw.cz [online]. 2009-10-11 [cit. 2011-12-09]. Gyroskopy v integrovaném provedení MEMS. Dostupné z WWW: <<http://automatizace.hw.cz/mereni-a-regulace/ART208-gyroskopy-v-integrovanem-provedeni-mems.html>>.
- [12] ALLAN W.,David . Statistics of atomic frequency standards. In Vincislav F. Kroupa, editor, Frequency Stability: Fundamentals and Measurement. IEEE Press, February 1966.
- [13] IEEE Standard Specification Format Guide and Test Procedure for Single- Axis Interferometric Fiber Optic Gyros. United States of America : The Institute of Electrical and Electronics Engineers, Inc., 1997. 83 s. Dostupné z WWW:

- <<http://ieeexplore.ieee.org/stamp/stamp.jsp?tp=&arnumber=660628>>. ISBN 1-55937-961-8.
- [14] YONG, Yin, et al. Structural scheme design and simulation of structure-decoupled dual-mass MEMS gyroscope. *Journal of Southeast University (Natural Science Edition)*, 2008, 38(5):918-922(in chinese)
 - [15] YONG, Yin, Wang SHOURONG, Wang CONCHAO a Bo YANG. Structure-Decoupled Dual-Mass MEMS Gyroscope with Self-Adaptive Closed-Loop Detection [online]. 2010[cit. 2012-04-29]. Dostupné z: <http://ieeexplore.ieee.org/stamp/stamp.jsp?tp=&arnumber=5592480>
 - [16] YAZDI, NAVID, FARROKH AYAZI a KHALIL NAJAFI. Micromachined Inertial Sensors [online]. 1998[cit. 2012-04-29]. IEEE, Vol. 86, No. 8. Dostupné z: <http://ieeexplore.ieee.org/stamp/stamp.jsp?tp=&arnumber=704269&userType=inst>
 - [17] HE, Guohong a Khalil NAJAFI. A SINGLE-CRYSTAL SILICON VIBRATING RING GYROSCOPE [online]. 2002, 4 s.[cit. 2012-05-01]. Micro Electro Mechanical Systems: IEEE International Conference, 15. Dostupné z: <http://ieeexplore.ieee.org/stamp/stamp.jsp?tp=&arnumber=984371>
 - [18] ANALOG DEVICES. Datasheet: ADXL 335. Rev B. 2009, 16 s. Dostupné z: http://www.analog.com/static/imported-files/data_sheets/ADXL335.pdf
 - [19] ANALOG DEVICES. Datasheet: ADXL 193. Rev B. 2010, 12 s. Dostupné z: http://www.analog.com/static/imported-files/data_sheets/ADXL193.pdf
 - [20] ANALOG DEVICES. Datasheet: ADXL 321. Rev 0. 2007, 16 s. Dostupné z: http://www.analog.com/static/imported-files/data_sheets/ADXL321.pdf
 - [21] FREESCALE SEMICONDUCTOR. Datasheet: MMA 7361L. Rev 0. 2008, 11 s. Dostupné z: http://www.freescale.com/files/sensors/doc/data_sheet/MMA7361L.pdf
 - [22] FREESCALE SEMICONDUCTOR. Datasheet: MMA 7260QT. Rev 5. 2008, 12 s. Dostupné z: http://www.freescale.com/files/sensors/doc/data_sheet/MMA7260QT.pdf
 - [23] ANALOG DEVICES. Datasheet: ADXL 321EB. Rev 0. 2005, 2 s. Dostupné z: http://www.analog.com/static/imported-files/eval_boards/143456412ADXL321EB_0.pdf
 - [24] Sparkfun Electronics: MMA7361 BreakOut board. [online]. [cit. 2012-05-06]. Dostupné z: <http://sparkfun.com/datasheets/Sensors/Accelerometer/MMA7361-Breakout-v11.pdf>
 - [25] MATSUSHITA ELECTRIC WORKS. GS3 SENSOR: Datasheet. 6 s.
 - [26] MEMSIC. MXA6500: Datasheet. 2007, 6 s. Dostupné z: www.memsic.com. Rev.C.

Zoznam skratiek

SFS	Specific force sensor – snímač špecifickej sily
DUT	Device under test – zariadenie ktoré sa testuje
AC	Alternating current – striedavé napätie
DC	Direct current – jednosmerné napätie
DAQ	Data acquisition – zber dát
lvm	LabView Measurement file
ppm	parts per million – miliontina
INS	Inertial navigation system – inerciálny navigačný systém
ARW	Angle random walk
NI	National Instruments

Zoznam príloh

Príloha 1. CD/DVD